

JYSK LANDBRUG, LANDBRUG OG FØDEVARER OG VIDENCENTER FOR
LANDBRUG

ADRESSE COWI A/S
Parallevej 2
2800 Kongens Lyngby

MARKVANDING OG VANDLØB

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

NOTAT

INDHOLD

Sammendrag	1
1 Indledning	3
1.1 Baggrund	3
1.2 Markvanding i Danmark	4
1.3 Definition af medianminimum	5
1.4 Geografiske forskelle	5
1.5 Bestemmelse af medianminimum i oplande med lange måleserier	8
1.6 Fastlæggelse af medianminimum i oplande med få data	13
1.7 Fastlæggelse af acceptabel påvirkning	16
1.8 Fastlæggelse af "oprindelig" medianminimum	17
1.9 Konklusion af de generelle overvejelser	28
2 Hydrogeologiske forhold	29
2.1 Modelopstilling og -scenarier	29
2.2 Beregningsresultater	31
2.3 Samlet konklusion af modelleringen	36
3 Referencer	39

Sammendrag

Baggrund

Som en del af arbejdet med anden generation af vandplaner arbejdes der på at ska-

PROJEKTNR.
DOKUMENTNR. 1
VERSION 2
UDGIVELSESDATO Januar 2013
UDARBEJDET ANRE, BOC, MUM
KONTROLLERET BEVI
GODKENDT ANRE

be et bedre grundlag for at vurdere, hvordan vandindvinding til markvanding påvirker vandløbene. Der er enighed om, at vandindvinding reducer vandføringen, specielt tørre somre, og dermed påvirker vandløbenes økologi negativt. Der er imidlertid stor usikkerhed omkring påvirkningens størrelse og økologiske betydning.

Dette notat beskriver karakteristiske forhold ved lav vandføring i vandløbene, lav vandførings betydning for vandløbenes økologi, og hvordan medianminimum bruges til at administrere tilladelser til markvanding. Desuden indeholder notatet en hydrogeologisk vurdering af markvandingens påvirkning af afstrømningen baseret på modelberegninger af udvalgte scenarier.

Hydrologisk vurdering

Notatet beskriver den store forskel, der er på vandløb i øst og vest. De vestjyske vandløb har således en høj og ensartet minimumsvandføring, mens der er langt mindre minimumsvandføring i østdanske vandløb, større usikkerhed, og større variation fra år til år.

Notatet påviser, at reguleringen af indvindingen er forbundet med meget stor usikkerhed vedrørende:

- › Den økologiske betydning af reduceret vandføring og dermed fastsættelse af en økologisk acceptabel reduktion
- › Fastlæggelse af nuværende medianminimum
- › Bestemmelse af oprindelig medianminimum
- › Beregning af den reduktion i medianminimum en given indvinding medfører.

Forarbejdet til første generations vandplaner med hensyn til kortlægning af behovet for reduktion i vandindvinding er diskuteret i notatet. Det fremgår af dette arbejde, at der er stor usikkerhed på påvirkningen af de enkelte vandløb på grund af utilstrækkelig hydrogeologisk viden, og fordi der har været nødvendigt at betragte alle vandløb i et delopland som ens uanset de økologiske forskelle, der er mellem de enkelte strækninger indenfor et delopland.

Modellering

Betydningen af en oppumpning til markvanding i forhold til påvirkning af minimumsvandføring er undersøgt ved hydrogeologisk modellering af et opland på en hedeslette i Ringkøbing Fjords opland. På basis af de gennemførte modelberegninger kan der drages følgende overordnede konklusioner:

- › Påvirkningen af minimumsvandføringen var højst 27 % af indvindingen.
- › Indvindingsboringens placering (afstand til) i forhold til vandløbet har tydelig betydning for påvirkningen. Der er 80 % større påvirkning ved placering af indvindingsboringen 100 m fra vandløbet i forhold til 900 m fra vandløbet.

- › De hydrogeologiske forhold tæt på vandløbet har en tydelig betydning for påvirkningen. Vandløbsbundens hydrauliske ledningsevne har stor betydning og kan give en variation i påvirkningen på op til en faktor 1,8.
- › Det har ligeledes tydelig betydning, hvordan de hydrogeologiske forhold generelt er i det område, hvor indvindingen sker. Et tyndt lerlag nedsætter påvirkningen væsentligt.
- › Oppumpningsperioden har mindre betydning på størrelsen af påvirkningen.
- › Påvirkningen indtræffer relativt langt nedstrøms vandløbet i forhold til placeringen af indvindingsboringerne. Dette betyder, at effekten af oppumpningen dels spredes ud over oplandet og over tid og derfor ikke påvirker lokalt.

Konklusion

Modelleringen understreger, at de lokale og regionale hydrogeologiske forhold har stor betydning for påvirkningen fra oppumpning. Dette betyder, at det er svært at give generelle retningslinjer for, hvordan påvirkning skal beregnes og dermed for, hvordan indvindingstilladelser skal gives.

Uanset denne usikkerhed er det nødvendigt at finde et administrationsgrundlag, som må basere sig på den bedste tilgængelige viden om, hvordan indvindingen påvirker vandløbenes økologi. Det anbefales derfor, at de gældende retningslinjer anvendes fleksibelt, således at man kan lempe kravene efter en konkret vurdering. I en sådan vurdering bør indgå en undersøgelse af, om det er muligt at opnå den krævede vandløbskvalitet ved at skabe større fysisk variation og ændre vedligeholdelsen, således at habitatet forbedres, samtidig med at den nuværende indvinding bibeholdes.

1 Indledning

1.1 Baggrund

Vandindvinding reducerer vandløbenes vandføring og kan dermed forringe vandløbenes økologiske status.

I de første vandplaner¹ blev dette problem beskrevet, og planerne påpeger, at der på mange konkrete vandløbsstrækninger er behov for at forbedre minimumsvandføringen. Vandplanerne fastsætter mål for den økologiske tilstand af de fleste vandløb og sætter krav til den højest tilladelige reduktion af vandføringen, som vandindvinding må give anledning til.

¹ Planerne blev efter to års forsinkelse vedtaget 22. december 2011, men blev ophævet af Natur- og Miljøklagenævnet den 6. december 2012, fordi klagenævnet fandt fristen for den supplerende høring for kort. Nævnet tog ikke, og kan ikke tage, stilling til planernes indhold. De ophævede planer er derfor bedste bud på indholdet i de kommende planer.

Det bør tilføjes, at vandindvinding ikke kun påvirker vandføringen i vandløb, men også sænker grundvandstanden i indvindingsområdet, og det kan påvirke vådområder. Nogle steder er en sådan sænkning måske af større påvirkning for naturen end påvirkningen af lave vandføringer i vandløbene. Betydningen heraf afhænger dog helt af de lokale forhold og diskuteres ikke i dette notat.

Kravene er fastsat som den maksimale reduktion af vandløbenes medianminimumsvandføring under upåvirkede forhold (Tabel 1). Kravene er stort set en videreførelse af ældre retningslinjer med forskellige krav for forskellige typer vandløb. Kravene gælder ikke for drikkevand. Kravene er beskrevet i By- og Landskabsstyrelsens retningslinjer for udarbejdelse af indsatsprogrammer (BLST, 2010).

Tabel 1 Vejledende krav til maksimal påvirkning af vandløb som følge af vandindvinding (BLST, 2010)

Miljømål	Maksimal påvirkning af vandløbets medianminimumsvandføring (Qmm)	Miljøstyrelsens vejledning fra 1979
Høj økologisk tilstand	5 %	A og B1
God økologisk tilstand	10 %	B2
God økologisk tilstand	15 %	B2
God økologisk tilstand	25 %	B3
	50 %	Øvrige mål (sejlads m.v.)

Regeringen besluttede imidlertid at udskyde tiltag over for kvantitativ påvirkning af overfladevand som følge af vandindvinding. Udskydelsen blev begrundet i manglende viden. Indsatsen i første periode består derfor hovedsageligt i at tilvejebringe yderligere viden om indvindingen og dennes påvirkning af vandføringen og vandløbene, således at der er tilvejebragt et bedre grundlag for næste generations vandplaner, som vil dække 2015 til 2021.

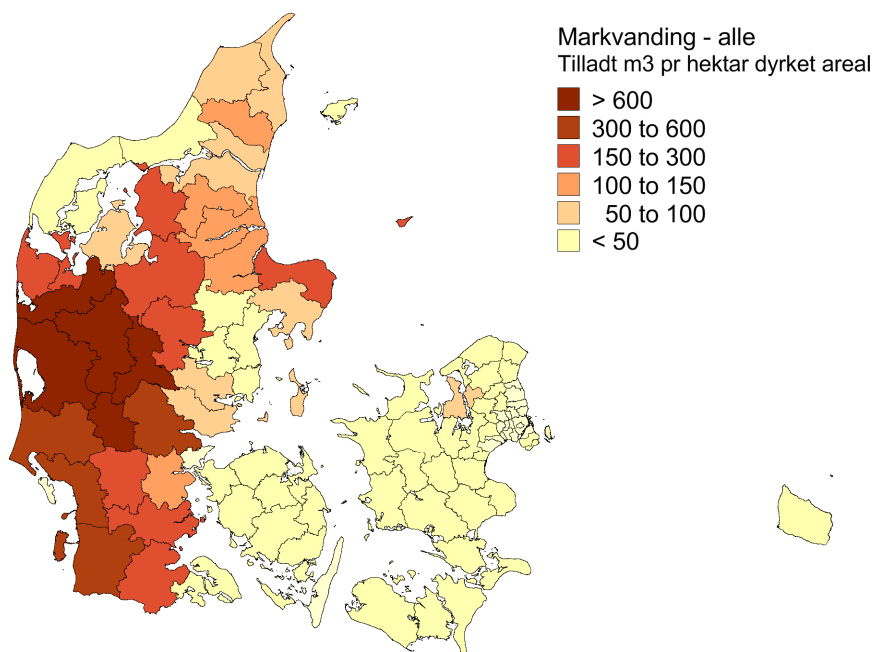
I den forbindelse har Jysk Landbrug, Landbrug og Fødevarer og Videncenter for Landbrug bedt COWI redegøre for forskellige aspekter af problemstillingen i forbindelse med markvanding.

Dette notat indeholder dels

- › en hydrologisk vurdering af metoder til bestemmelse af medianminimumsvandføring i målte og umålte vandløb, og
- › en hydrogeologisk vurdering af markvandingens påvirkning af afstrømningen.

1.2 Markvanding i Danmark

I Danmark foregår markvanding nu stort set udelukkende ved indvinding fra grundvand. Indvindingen er meget ujævnt fordelt og har en markant overvægt i det sandede Vestjylland (Figur 1).



Figur 1 Markvandingstilladelser udtrykt i m³ pr. ha landbrugsreal. Indeholder alle tilladelser fra samtlige markvandingsboringer uanset status. (Figur fra udkast til Arbejdsnotat om balance mellem vandforekomster og vandindvinding til markvanding. Oktober 2012. Data fra Jupiter)

1.3 Definition af medianminimum

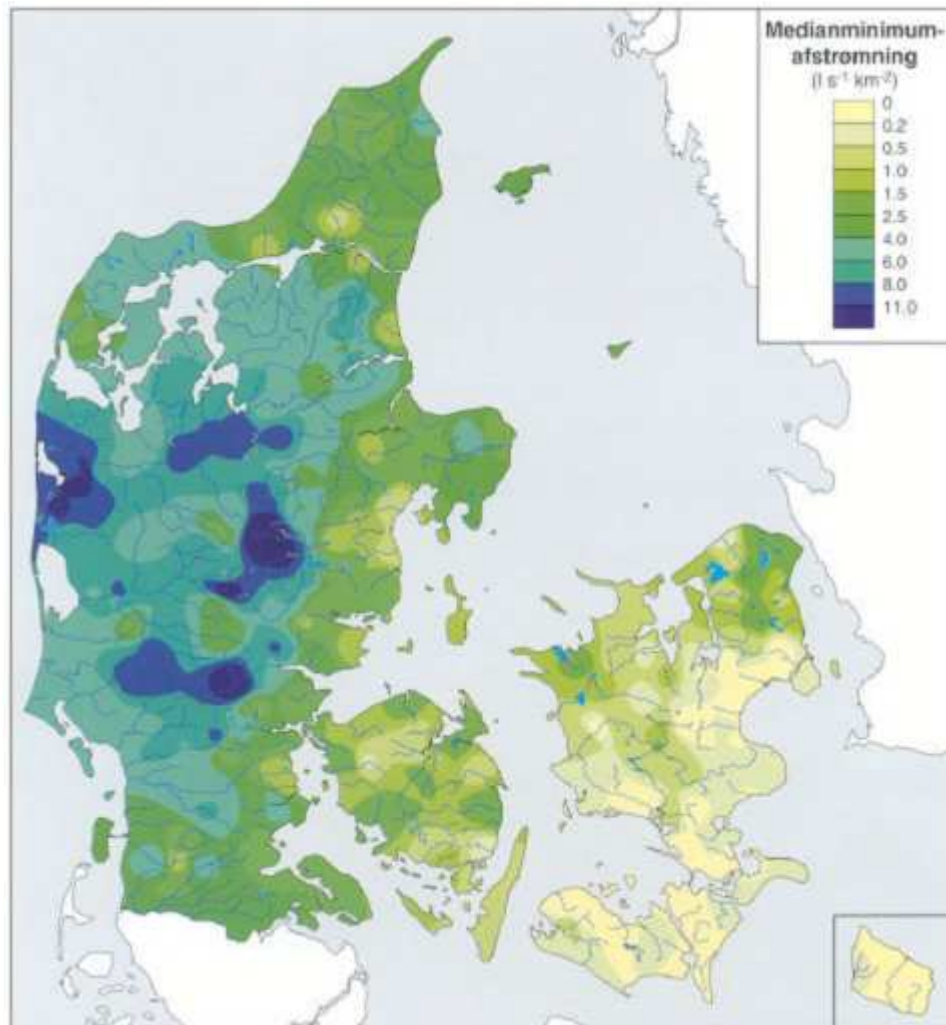
Medianminimum er et enkelt statistisk udtryk for en lav vandføring, og det anvendes derfor i Danmark til at regulere vandindvinding.

Medianminimum defineres som medianen af årsminima for døgnmidlede vandføringer.

Medianminimum bestemmes ved først at finde den laveste døgnmiddelvandføring for hvert år i en årrække. Medianen er den værdi, som ligger i midten, hvis man sorterer de årlige minimumsværdier efter størrelse. Over en lang periode vil årets laveste vandføring således hvert andet år være lavere end medianminimum og hvert andet højere. Man kan også sige, at medianminimum har en gentagelseshyp-pighed på 2 år.

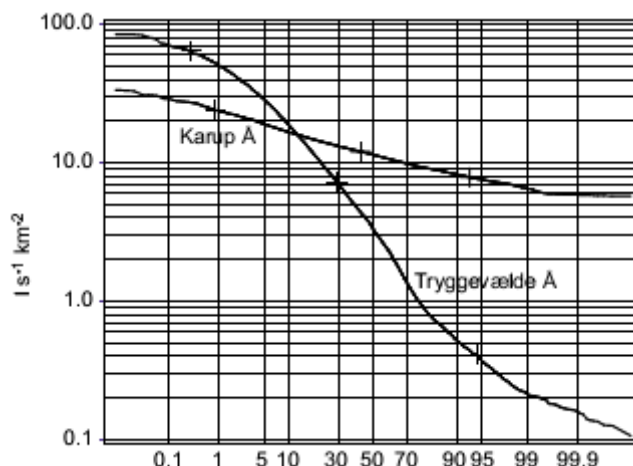
1.4 Geografiske forskelle

Der er meget stor forskel mellem vandløbene i de forskellige dele af Danmark, og det ses på Figur 2, som viser de regionale forskelle i medianminimumafstrømning.



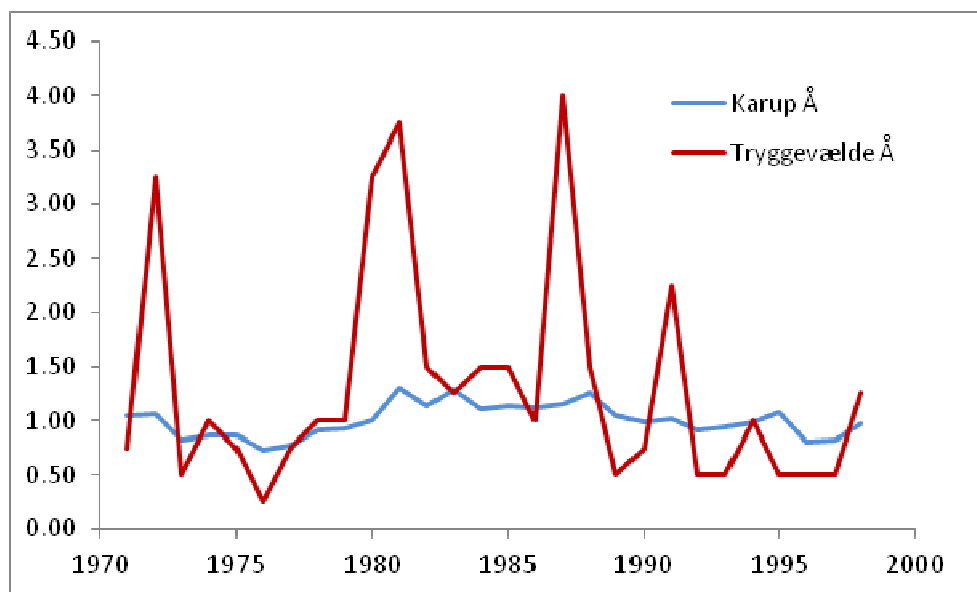
Figur 2 Regionale forskelle i medianminimumafstrømning (figur fra Miljøstyrelsen (2003) der citerer FR 340)

Forskellene illustreres også af varighedskurverne for Karup Å og Tryggevælde Å (Figur 3). Figuren viser, at vandføringen er langt mere stabil i Karup Å. Karup Å har således et medianminimum på $8,0 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, hvilket er 66 % af middelfløden, mens Tryggevælde Ås medianminimum kun er $0,4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ eller 6 % af middel.



Figur 3 Varighedskurver for Karup Å og Tryggevejlede Å (FR340 Fig. 4.1). Medianmaksimum og medianminimum er vist med +. Overskridelsessandsynligheden er vist på en normalfordelt sandsynlighedsakse.

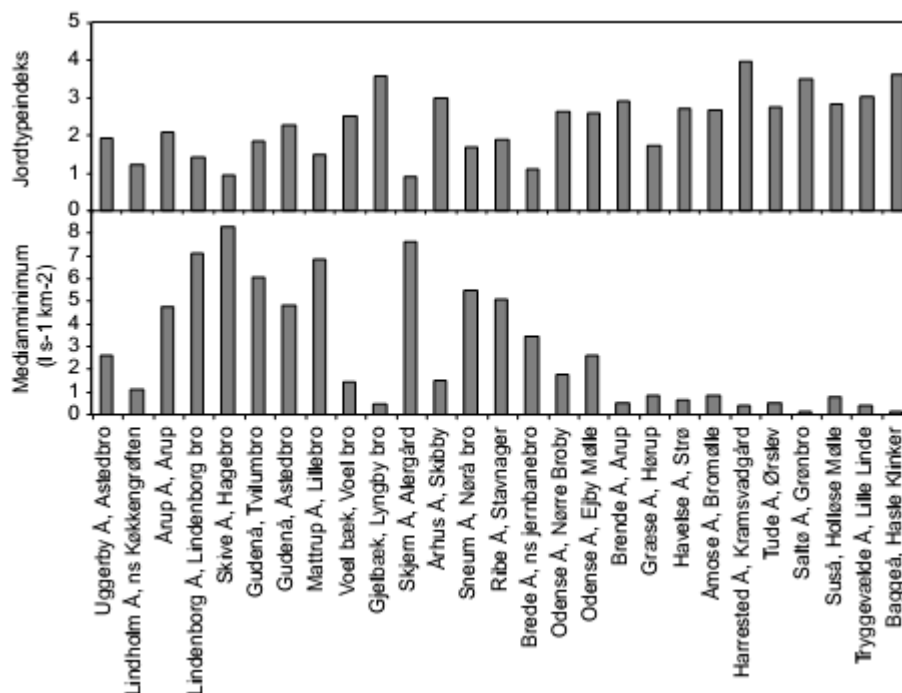
Variationen i årsminimum fra år til år er også langt mindre i de vestjyske vandløb med stort grundvandsbidrag end i de sjællandske vandløb. Figur 4 viser således, hvor meget årsminimum afviger fra medianminimum for henholdsvis Karup Å og Tryggevejlede Å.



Figur 4 Variationen i årsminima for Karup Å og Tryggevejlede Å for perioden 1971-1998 (på grundlag af data i FR340). Y-aksen viser forholdet mellem årsminimum og medianminimum., således at en værdi på 1 angiver, at årets minimum netop var lig medianminimum. Medianminimumsvandføringen er ca. 20 gange højere i Karup Å end i Tryggevejlede Å.

I nogle år er den laveste vandføring væsentligt over medianminimum, i andre væsentligt under. I Tryggevejlede Å forekom en vandføring på 50 % eller mindre af medianminimum således i 7 år ud af 28, mens sådanne lave værdi ikke forekom i samme periode i Karup Å. Hvis man tillader, at vandføringen i et vandløb med lav sommervandføring reduceres med f.eks. 25 % af medianminimum, kan man således i meget tørre år komme ud for, at vandløbet tørrer helt ud. I et vandløb med stabil vandføring, er der meget ringe chance for, at dette sker.

Forskellene skyldes regionale forskelle i nedbør og geologi. Betydningen af jordbund er illustreret på Figur 5.



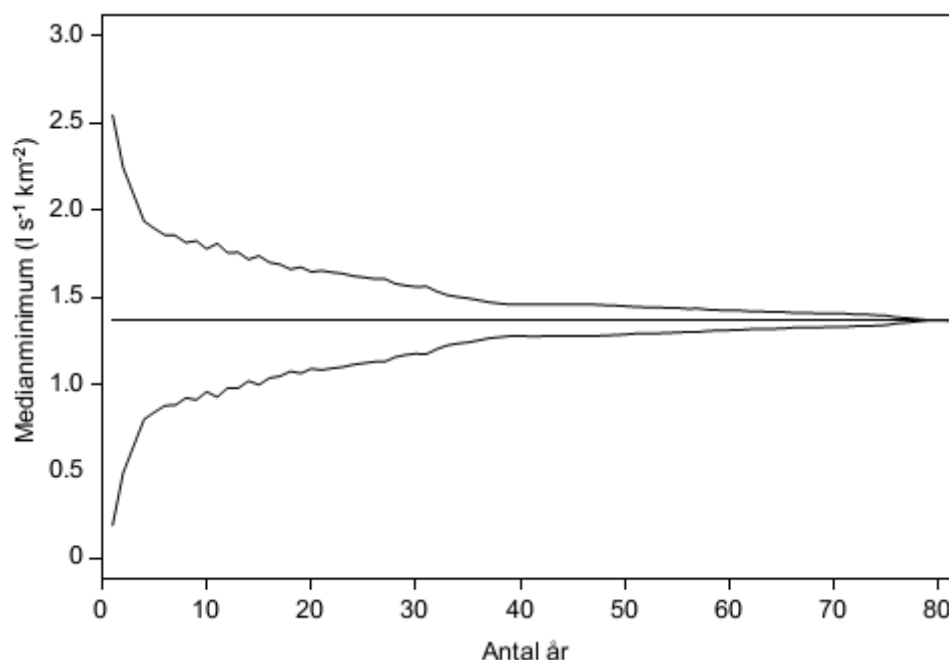
Figur 5 Jordbundsforholdene har stor betydning. Det ses tydeligt, at de lerede jorde, der har et højt jordtypeindeks, har lavt medianminimum, mens de sandede har højt (fra FR340 Fig. 2.4)

Udstrømningen af grundvand varierer lokalt afhængigt af de geomorfologiske forhold. En undersøgelse af fynske vandløb (Dahl et al., 1998) viser således, at det generelle billede er, at den største grundvandsdannelse formentlig sker i tre højtliggende områder, men at der er ingen eller kun ringe udstrømning af grundvand i de øverste dele af oplandene. Den største udstrømning sker på ”yderflanken” af de højtliggende områder, og i de lavtliggende områder er der igen ringe udstrømning.

1.5 Bestemmelse af medianminimum i oplande med lange måleserier

Statistisk usikkerhed og observationsperiodens længde

Årsminimum varierer en del fra det ene år til det andet - især i vandløb, hvor der er stor forskel mellem høj og lav vandføring. Da der jo kun bruges et enkelt døgnsmåling fra hvert år til bestemmelse af medianminimum, kræver en god bestemmelse en lang tidsserie. Usikkerheden er størst i vandløb, hvor afstrømningen varierer meget, det vil sige, hvor minimumsvandføringen er lav. Der kræves således generelt længere dataserier i Østdanmark end i Vestjylland. Et eksempel på betydningen af måleperiodens længde fremgår af Figur 6.



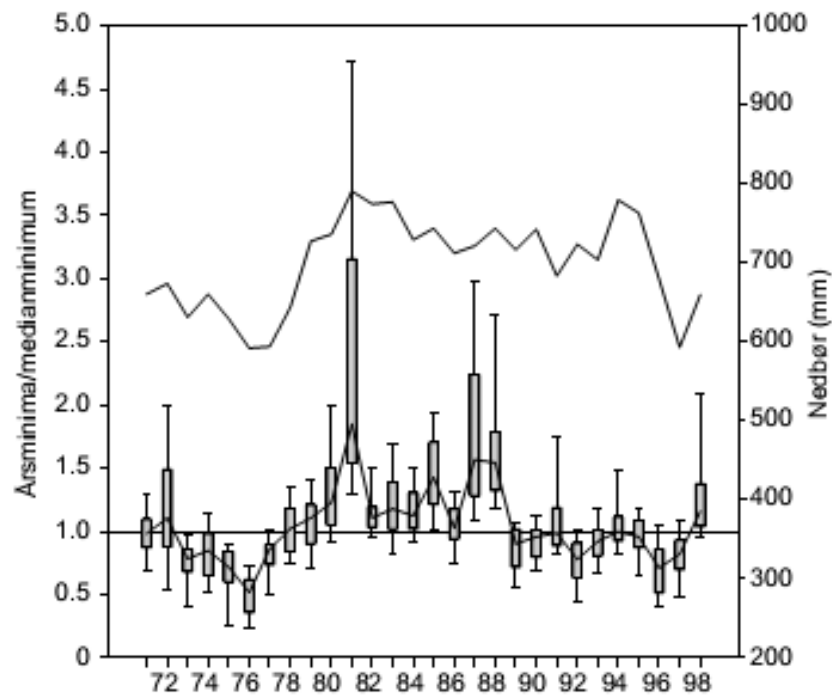
Figur 6 *Betydning af beregningsperiodens længde (FR340 Fig.4.5) for bestemmelse af medianminimum i Odense Å. Medianminimum er beregnet som samtlige kombinationer af sammenhængende perioder. Kurverne viser 2 gange standardafvigelsen.*

Figur 6 viser, at der er betydelig usikkerhed på fastlæggelse af medianminimum, hvis man ikke har en meget lang måleserie. For den pågældende målestation er der f.eks. ved en måleserie på 15 år 95 % sandsynlighed for, at den beregnede medianminimum afviger mindre end 25 % fra den "sande" værdi.

Variation fra periode til periode

Klimaændringer er ikke bare noget, der vil indtræffe en gang i fremtiden. Der har også været ændringer i klimaet i de sidste mange år, og det er derfor ikke ligegyldigt, hvilken referenceperiode man bruger til bestemmelse af medianminimum.

Figur 7 viser, at årsminimum i nogle perioder ligger over medianminimum, i andre under. I mange år ligger årsminimum under 50 % af medianminimum. Man kunne vente, at årsminimum er høj i perioder, hvor grundvandsmagasinerne er "fyldt op", og figuren viser, at der er en vis sammenhæng mellem årsnedbør og årsminimum. Den lave nedbør i begyndelsen af 70'erne resulterede i lave årsminima, som i mange vandløb faldt til under 50 % af medianminimum og i 10 % af vandløbene faldt minimum til under 25 % af medianminimum. I de efterfølgende våde år steg årsminimum igen. Sammenhængen er dog ikke særlig god, for faldet i årsminimum i perioden 1989-1995 faldt ikke sammen med lav årsnedbør. Dette fald skyldes lav sommernedbør.



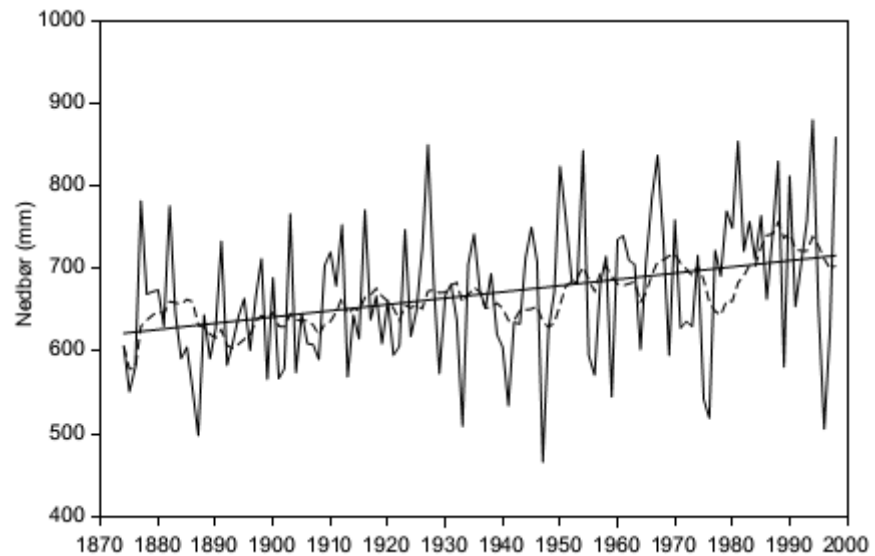
Figur 7 Betydningen af valgt af referenceperiode. Figuren (fra FR340 Figur 4.3) viser et Box-Whisker plot (10, 25, 50, 75 og 90 percentiler) med data fra 39 stationer (fra hele Danmark) af årlig minimum delt med medianminimum. Øverst ses årsnedbør som et 3-års glidende gennemsnit.

I de østdanske vandløb er minimumsvandføringen følsom for den aktuelle årsnedbør, mens afstrømningen i de vestdanske vandløb med stor grundvandstilførsel fra langsomt reagerende magasiner ikke i samme grad er påvirket af det enkelte års nedbør, men mere følsomt for flerårige ændringer i nettonedbør.

Afviigelser i forhold til det generelle niveau af årsminima kan, ud over regionale forskelle, også skyldes usikkerhed på bestemmelse af vandføringen i minimumssituationen (især i grødefyldte vandløb). Dette problem er størst ved meget små vandføringer.

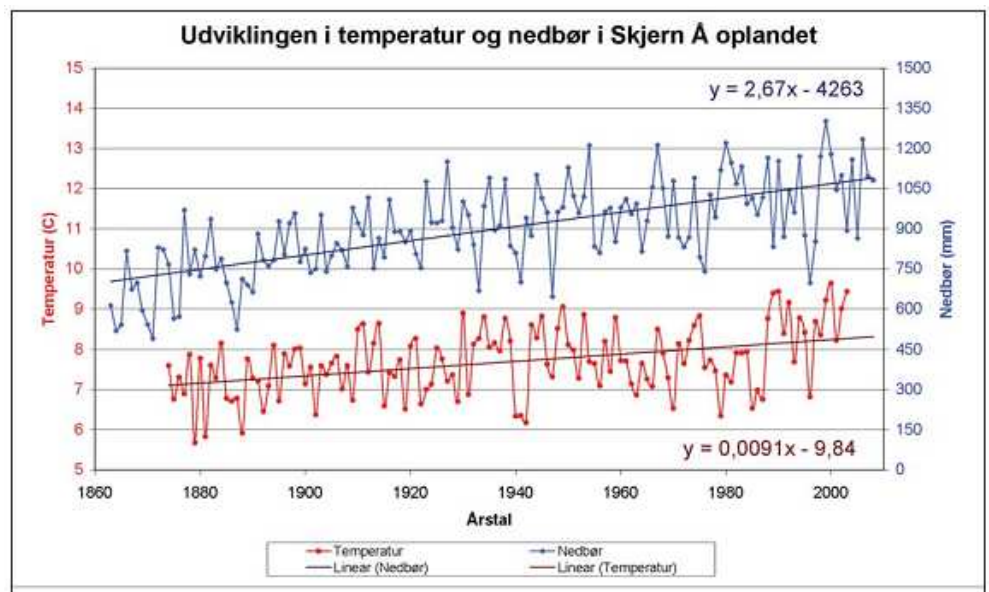
Udvikling i løbet af måleperioden

En lang måleperiode medfører, at systematiske ændringer i klimaet har betydning for resultatet. Figur 8 viser, at årsnedbøren gennem de sidste 125 år har været stærkt svingende, men jævnt stigende. Den årlige middeltemperatur er steget i samme periode.



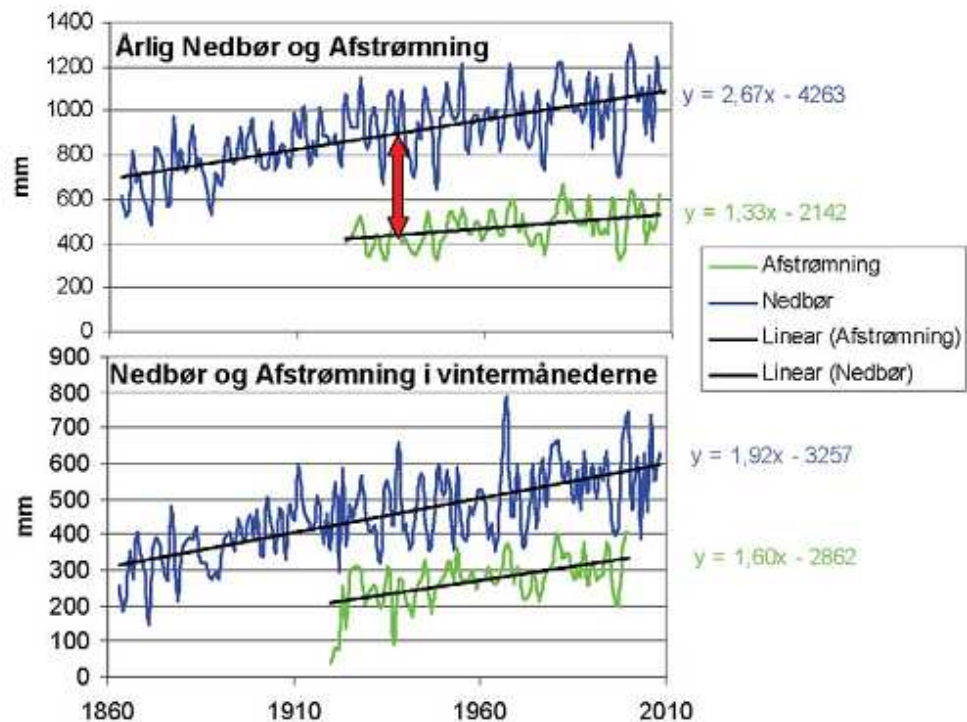
Figur 8 *Udvikling i middelnedbør for perioden 1874-1998 (fra FR340 Fig. 3.1)*

I Vestjylland har udvikling i nedbøren været kraftigere, nemlig 266 mm (Karlsson et al., 2010). Stigningen er især sket i vinterhalvåret, mens der kun har været mindre stigning om sommeren.



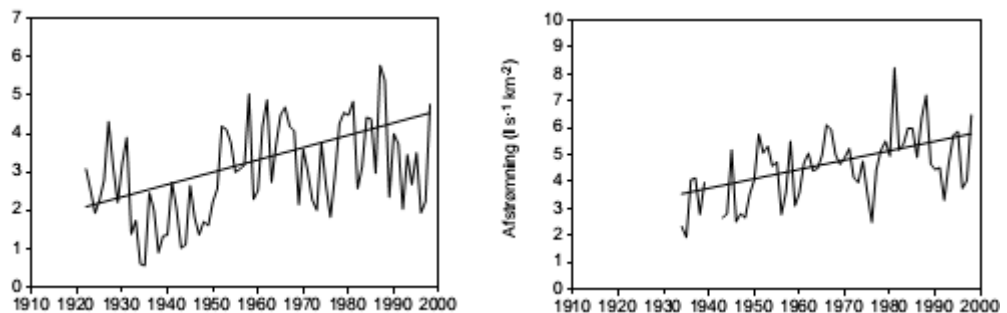
Figur 9 *Udviklingen i nedbør og temperatur for Skjern-område (fra Karlsson et al., 2010)*

Stigningen i afstrømningen har i samme område (Skjern Å ved Alergårde) har været 133 mm, dvs. kun halvdelen af stigningen i nedbør (Figur 10). Det skyldes øget fordamning som følge af højere temperatur og ændret arealanvendelse, herunder tilplantning af heden og vanding fra 1970'erne.



Figur 10 Historisk udvikling i afstrømningen i Skjern Å ved Alergård. Det ses, at den årlige afstrømning i vintermånederne følger stigningen i nedbøren, men på årsplan er stigningen i afstrømningen mindre end nedbørstigningen.

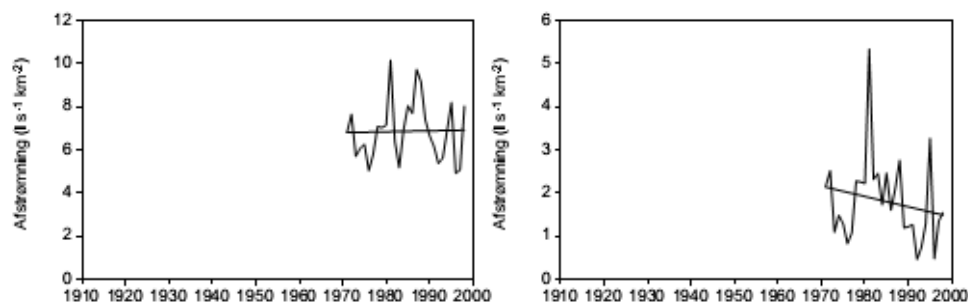
Bilag 5 i FR340 viser udviklingen for de enkelte stationer. To eksempler på udviklingen i årsminima for stationer med lange tidsserier er vist i Figur 11. De viser begge en stigende tendens.



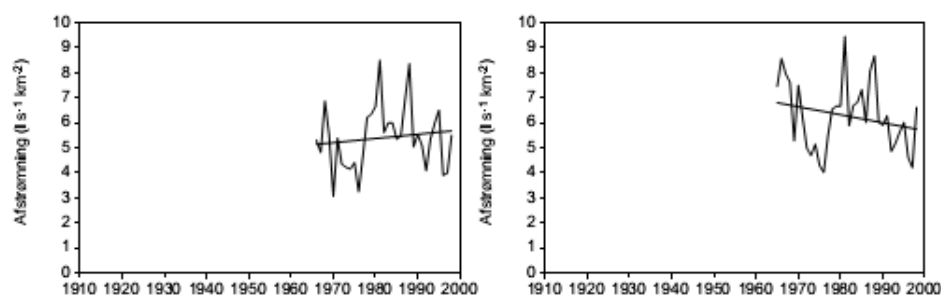
Figur 11 Udviklingen i medianminimum i to vestjyske stationer (tv. Brede Å, Bredebro og th. Ribe Å, Stavnager Bro) (Figur fra FR340)

FR340s analyse af udviklingen af årsminima for 39 stationer er fordelt over hele landet for perioden 1971-98 viser også en stigende tendens for denne periode, men den er mindre udtalt end stigningen i middelafløb, og kun i et tilfælde var den signifikant inden for denne periode.

Figur 12 og Figur 13 viser eksempler fra andre vestjyske stationer, hvor stigningen er mindre, eller der er sket et fald. Det er uvist, om disse forskelle mellem de enkelte stationer skyldes tilfældig variation i lokale nedbørshold, vandindvinding, spildevandspåvirkning eller andre forhold.



Figur 12 *Minima ved Storå (tv. Skærum Bro og th. Højris)*



Figur 13 *Minima for Sneum Å, Nørå Bro (tv.) og Kongeå, Konge Bro(th.)*

Ændringer i arealanvendelsen i oplandet indenfor måleperioden påvirker også resultatet, ligesom vandløbsregulering og ændring i dræningsforholdene i oplandet kan spille ind.

1.6 Fastlæggelse af medianminimum i oplande med få data

I oplande med få data kan medianminimum fastlægges ved forskellige metoder, eller skøn baseret på en kombination af metoderne:

- › Synkronmålinger
- › Data fra sammenlignelige oplande
- › Modelberegninger

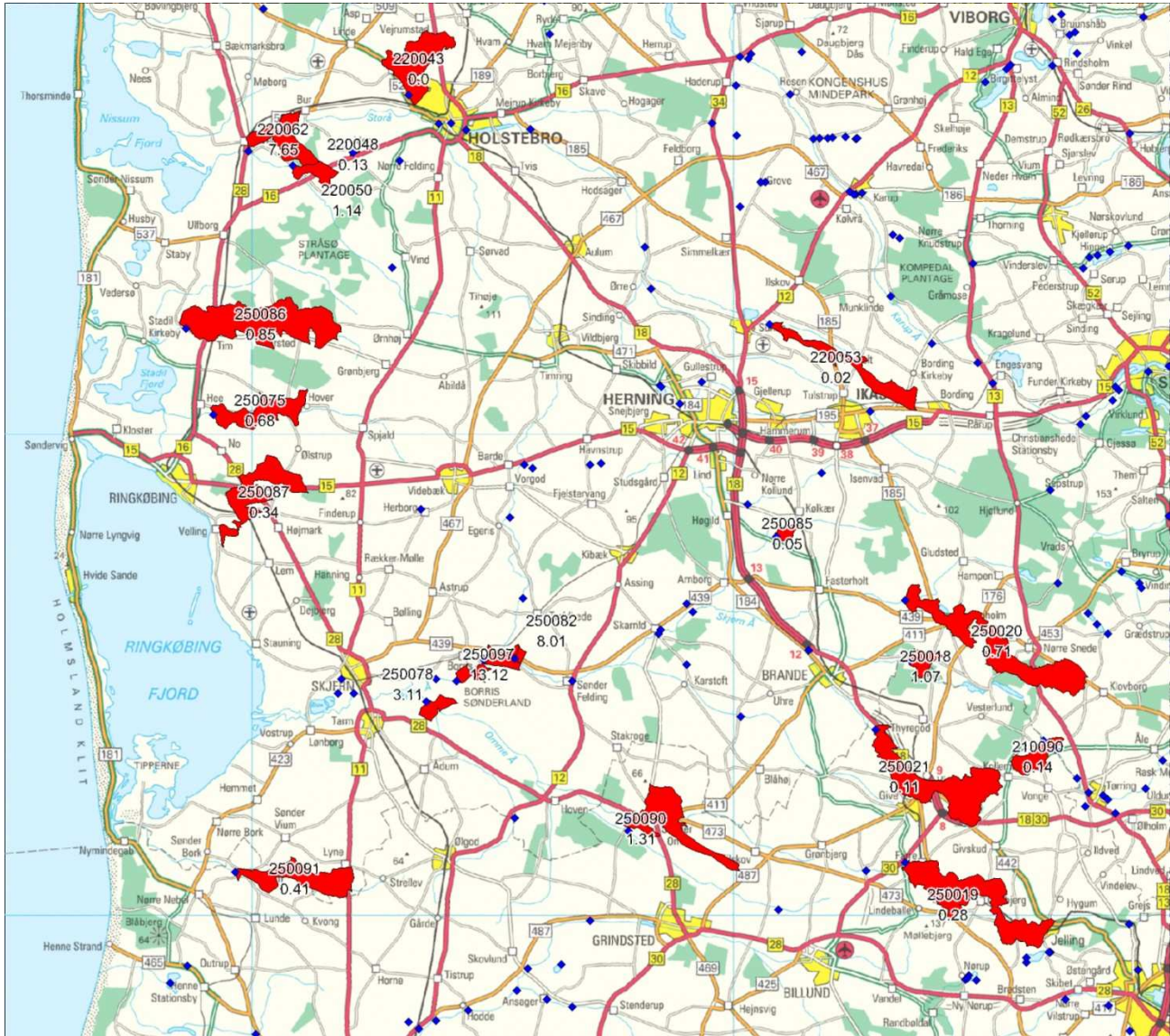
Synkronmålinger

I perioden 1996-1997 var der meget tørre somre, og der blev udført en række synkronmålinger på Sjælland, hvor vandføringen blev målt på en række vandløb i samme periode, således at man, efter korrektion for spildevand, kunne sammenligne data fra stationer med få målinger med data fra stationer med længere måleserier. Samme type målinger er også udført andre steder og i andre år.

Brug af data fra sammenlignelige oplande

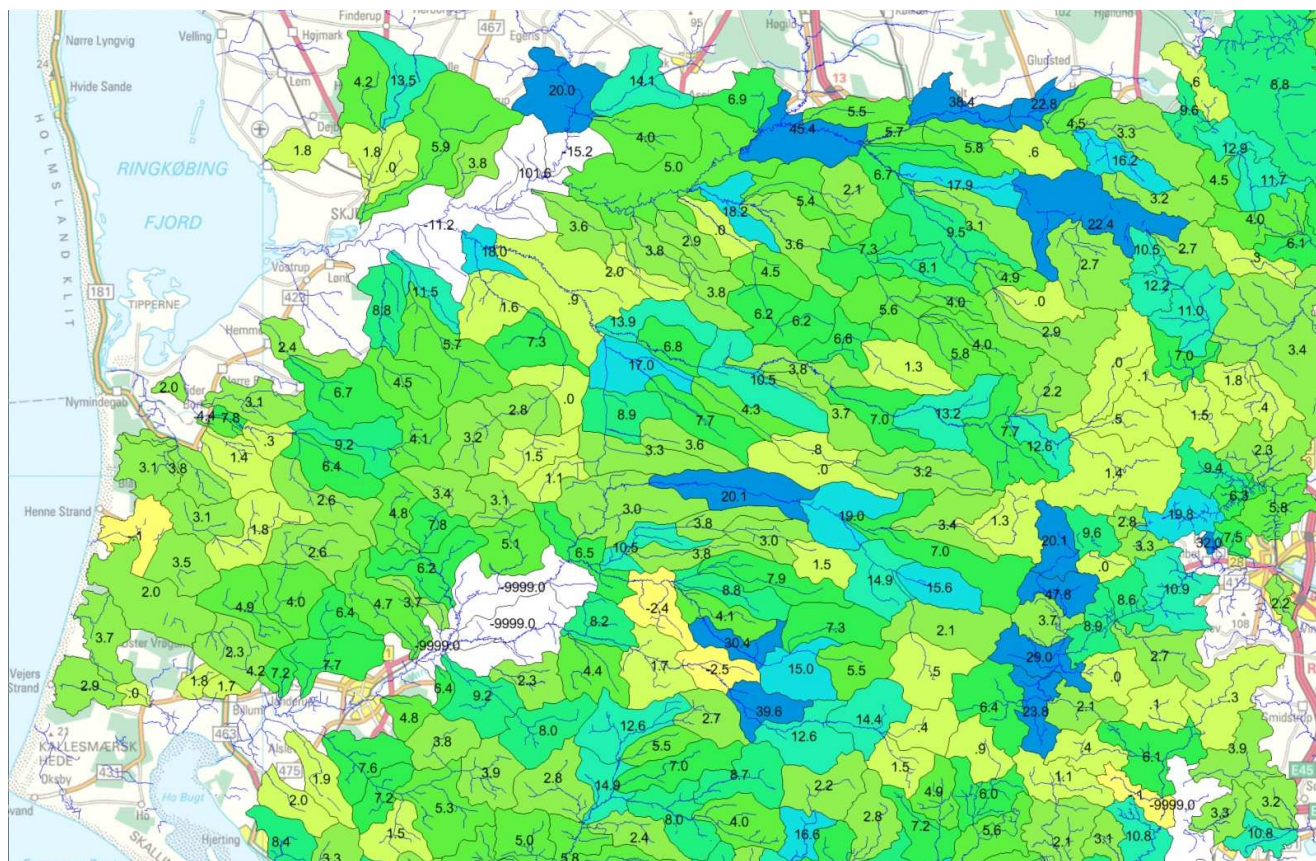
Man har ofte brug for at kende vandføringen i umålte oplande, og baserer normalt vurderingen ved at bruge data fra oplande, der vurderes sammenlignelige med hensyn til oplandets størrelse, fald, arealanvendelse, geologi osv. I forbindelse med meget små afstrømninger er denne metode meget usikker, fordi de lokale hydrogeologiske forhold kan være afgørende.

Til brug for denne opgave har vi beregnet medianminimum for perioden 1995-2006 for udvalgte oplande i Vestjylland (Figur 14). Det fremgår af figuren, at der er meget stor forskel på medianminimum mellem stationerne (afstrømningen varierer fra 0 til 13 i $l s^{-1} km^{-2}$).



Figur 14 Medianminimum for udvalgte oplande for perioden 1995-2006 beregnet på data fra Novana Omr. 5 fra DK-modellen. Tallene er hhv. stationsnumre og medianminimumafstrømning i $l s^{-1} km^{-2}$

Tilsvarende variation ses på Figur 15, der er baseret på udtræk fra en database og består af en kombination af målte værdier, synkronmålinger og skønnede værdier.



Figur 15 Medianminimumafstrømning angivet som tilstrømning i deloplande i $l s^{-1} km^{-2}$. Data er udtrukket fra en database, Orbicon har leveret til de vestjyske miljøcentre og består af samleopgørelser af synkronmålinger i de tidligere Ribe, Ringkøbing og Viborg amter. Database indeholder målte værdier, synkronmålinger og skønnede værdier uden korrektion for indvinding eller tilførsel af spildevand.

Den store variation i medianminimum må antages at skyldes forskelle i grundvandspotentialer og lagernes permeabilitet. Nogle vandløbsstrækninger tilføres således grundvand fra bunden eller kilder, der strømmer til vandløbet, mens der siver vand ud fra andre vandløbsstrækninger.

Modelberegning

I FR340 er det undersøgt, om der kunne findes korrelation mellem medianminimum og fysiske oplandskarakteristika som vandløbslængde, hældning, jordtype, nedbør, skov og bebygget areal. Jordtype og skovareal havde signifikant betydning, men rapporten konkluderer, at afvigelserne mellem modelbestemte og empirisk bestemte gentagelsesintervaller på årsminima er så store, at resultatet ikke uden videre kan anvendes i praksis. FR340 mener, at det kan skyldes, at der ikke indgår parametre, der karakteriserer de kulturelle indgreb, der har meget stor indflydelse på minimumafstrømningen.

I områder, hvor der er opstillet en hydrogeologisk model, kan denne bruges til at skønne medianminimum. Det forudsætter, at der er et godt kendskab til områdets geologi, og at der findes målte afstrømninger, som kan bruges til at kalibrere modellen med. Anvendelsen af hydrogeologiske modeller i Vestjylland er beskrevet i afsnit 1.8.3.

1.7 Fastlæggelse af acceptabel påvirkning

1.7.1 Vandrammedirektivet

Vandrammedirektivets hovedformål er at sikre, at de europæiske vandområder opnår god økologisk tilstand. Det betyder, at de biologiske kvalitetselementer kun afviger lidt fra referencetilstanden, dvs. de økologiske forhold, der findes i en given type vandområde under forhold upåvirkede af menneskelig aktivitet.

For vandløb omfatter de biologiske kvalitetselementer akvatisk flora, makroinvertebrater og fisk. I de første danske vandplaner spiller makroinvertebraterne (DVFI) den afgørende rolle for bedømmelsen af økologisk tilstand, og målopfyldelsen er defineret som faunaindeksklasser.

Opfyldelsen af de biologiske krav støttes af fysisk-kemiske elementer og hydro-morfologiske elementer (vandmængder, vandløbets udseende).

Vandplanerne stiller krav til den højest tilladelige påvirkning af vandføringen som følge af vandindvinding, idet de enkelte målsatte vandløb er klassificeret efter den maksimalt tilladelige reduktion af medianminimumsvandføringen som hhv. 5, 10, 15 eller 25 %.

I retningslinjerne for udarbejdelsen af vandplaner (Naturstyrelsen 2002) nævnes, at:

- › **Som udgangspunkt** bør indvindingen ikke medføre en reduktion af vandløbenes vandføring på over 5 % og 10-25 % af det oprindelige medianminimum, hvor miljømålene for vandløbet er hhv. høj økologisk tilstand og god økologisk tilstand. Den nærmere fastsættelse af den tilladelige reduktion indenfor sidstnævnte interval vurderes i forhold til vandløbstypen og vandløbets sårbarhed i øvrigt.
- › I områder der er påvirket af **almene vandforsyninger** kan der for vandløb, hvor miljømålene er enten høj eller god økologisk tilstand, fastsættes kravværdier for medianminimumsvandføringen, der accepterer en større %-reduktion end ovenfor angivet, hvis det ud fra et konkret kendskab til de hydro-morfologiske og fysisk-kemiske forhold vurderes, at miljømålene kan opnås.

Kravene til almene vandforsyninger er således mindre konkrete. Der gælder skærpede krav til internationale naturbeskyttelsesområder (Natura2000).

Vandplanerne nævner, at ”Omstrukturering af vandindvindingen er en økonomisk tung og teknisk vanskelig proces. For at give en realistisk gennemførlig forandringsproces anvendes undtagelsesbestemmelserne til at give fristforlængelse, således at det fulde mål for vandløbene nogle steder først kan være nået i 2027. Vandindvindingens påvirkning af vandområderne skal således reduceres fuldt ud igennem 3 planfaser.”

Til vandplan 2015-2021 har Naturstyrelsen nedsat en ny arbejdsgruppe til videreførelse af arbejdet med balance mellem vandforekomster og vandindvinding. Arbejdsgruppens kommissorium (Naturstyrelsen 2012) omfatter leverance af:

- › Anbefaling om beregning af vandløbspåvirkning på lokal skala.
- › Notat om samfunds- og erhvervsøkonomiske konsekvenser af (evt.) begrænsning i vandindvinding til markvanding.
- › Redegørelse om andre landes håndtering af markvanding.
- › Redegørelse om vandplanernes håndtering af markvanding i relation til kommunernes administration af vandindvindingstilladelser.

1.7.2 Sammenhæng mellem økologisk status og vandføring

De fleste danske vandløb har ikke god økologisk tilstand, hvilket først og fremmest skyldes fysiske forhold som regulering, grødeskæring, opgravning osv. Udledninger og okker spiller også en vigtig rolle nogle steder.

Der er dog ingen tvivl om, at vandløbenes hydrologiske regime, dvs. variationerne i vandføring, også har stor betydning for vandløbenes økologi, og lav vandstand og vandføring, og de relaterede effekter på vandets temperatur og iltindhold påvirker alle vandløbets organismer. Der mangler imidlertid mere præcis viden om, hvorledes de fysiske forhold og vandløbets organismer påvirkes ved forskellige ændringer i vandføringen i danske vandløb (FR499 s. 19).

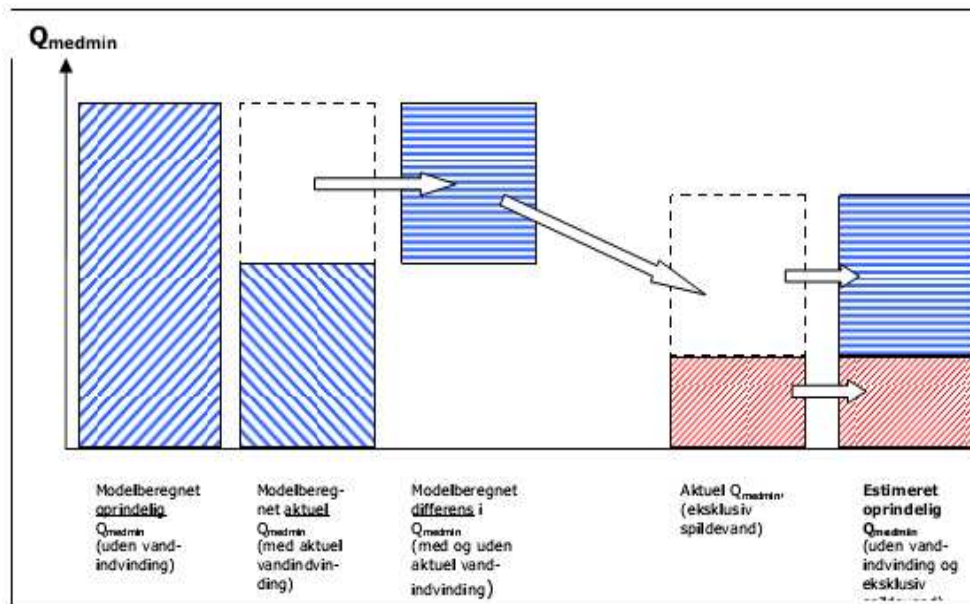
Der findes heller ikke egentlige indeks eller redskaber, der kan forudsige effekten af reduceret vandføring for danske forhold. Det er ikke kun vandføringen størrelse, men også dens variation og varigheden af forskellige hændelser, der har betydning for de biologiske forhold. I flere lande bruges medianminimumvandføringen som et mål for påvirkningen af vandløb i forbindelse med vandindvinding. På trods af et detaljeret kendskab til vandføringsvariationerne på mange målestationer i Danmark, findes der ikke præcis viden om, hvorvidt medianminimumvandføringen størrelse er et brugbart mål for påvirkning i relation til makroinvertebrater, vandplanter og fisk (FR499).

De fleste vandløb i Danmark er påvirkede af vandindvinding eller ændret hydrologisk regime i form af drænastrømning til vandløbet, så det vil være svært at finde vandløb især mellemstore og store vandløb med upåvirket hydrologisk regime. Ydermere forekommer vandløb, der naturligt har en meget lav sommervandføring, eller som periodevist er helt udtørrede i sommermånederne. Da de præcise konsekvenser af ændret hydrologisk regime i vandløb ikke kendes, er det svært at opstille et indeks til vurdering af, hvor meget vand der kan fjernes fra (eller tilføres) et givent vandløb, før de økologiske forhold påvirkes (FR499).

1.8 Fastlæggelse af "oprindelig" medianminimum

Den tilladelige påvirkning af den økologiske tilstand skal i henhold til vandrammedirektivet fastlægges i forhold til den "oprindelige" tilstand uden vandindvinding eller spildevandstilførsel.

Det ”oprindelige” medianminimum er i Sjællandsmodellen beregnet som den aktuelle medianminimum (korrigeret for tilførsel af spildevand) tillagt den reduktion i vandføringen som følge af indvinding, der kan beregnes med f. eks. en hydrogeologisk model som illustreret på Figur 16.



Figur 16 Bestemmelse af oprindelig medianminimum

Beregningen af oprindelige medianminimum i Vestjylland er beskrevet i afsnit 1.8.3.

1.8.1 Metoder til fastlæggelse af acceptabel påvirkning

Metoder anvendt i andre lande

Fastlæggelse af acceptabel vandføring har været genstand for mange konflikter gennem mere end 100 år, ikke mindst i forbindelse med vandkraft, overrisling og reservoirer. Konflikterne har været særligt store i forbindelse med laksefisk og vandkraft, men sejlads har også spillet en rolle i mange reguleringer. Der er derfor udviklet en lang række metoder til at fastlægge den acceptable vandføring og løse interessekonflikter. Disse har udviklet sig fra hydrologiske metoder til hydrauliske metoder, habitatmetoder og holistiske metoder, der søger at afbalancere de forskellige hensyn. I de fleste lande har reguleringen fokuseret på overfladevand, og interaktionen med grundvand har ikke spillet en rolle. Det er derfor svært at finde standarder for tilladelig indvinding af grundvand.

FR499 nævner uden nærmere angivelse, at medianminimum også bruges til regulering i flere andre lande. Vi har ikke undersøgt udenlandsk praksis fra tilsvarende områder, men Søren Kolind Hvid oplyser, at Aarhus Universitet netop har gennemført en spørgeundersøgelse i Sverige, Tyskland, Holland og England, og at der ikke i disse lande er rapporteret anvendelse af medianminimum i administrationen af indvindingstilladelser.

Vandrammedirektivet indeholder ikke bestemmelser, der direkte siger noget om acceptabel påvirkning. Grundlaget er derfor alene opnåelse af økologisk status for naturlige vandløb (og økologisk potentiale for stærkt modificerede vandløb).

Hydrologiske metoder

Hydrologiske metoder anvendes ofte til regulering, fordi de er enkle og kræver færre data end andre metoder. Krav til medianminimum er et eksempel på en hydrologisk reguleringsmetode.

Hvor der er en lang måleserie, er det aktuelle medianminimum en enkel, veldefineret størrelse, der udtrykker en vigtig egenskab ved vandløbet, som det er let at forholde sig til. Medianminimum har dette fælles med andre hydrologiske mål som absolut minimum, 7-dages minimum eller Q_5 , der er den vandføring, som netop er underskredet i 5 % af tiden.

Problemerne ved medianminimum er især:

- › Usikkerhed på bestemmelsen i målte vandløb
- › Usikkerhed på fastsættelse i umålte oplande
- › Usikker fastsættelse af ”upåvirket” medianminimum
- › Manglende sammenhæng mellem medianminimum og den dominerende biologiske indikator, DVFI.

Hydrauliske metoder og andre modeller brugt i udlandet

Hydrauliske metoder har fokus på at sikre vandhastighed, vanddybde og vådt areal for de arter, man anser for de vigtigste. Ud fra kendskab til vandløbets skikkelse og fald kan man ”oversætte” kravene til et bestemt vandføringsregime, der skal overholdes. ”Formel 7” er et dansk eksempel, som gennemgås i et senere afsnit.

Ulempen ved de hydrauliske metoder er, at de kræver godt kendskab til vandløbets skikkelse og til arternes krav. For nogle arter (især fisk) er det forholdene på en længere strækning vigtige, og det øger kravet til kendskabet til vandløbets fysiske forhold.

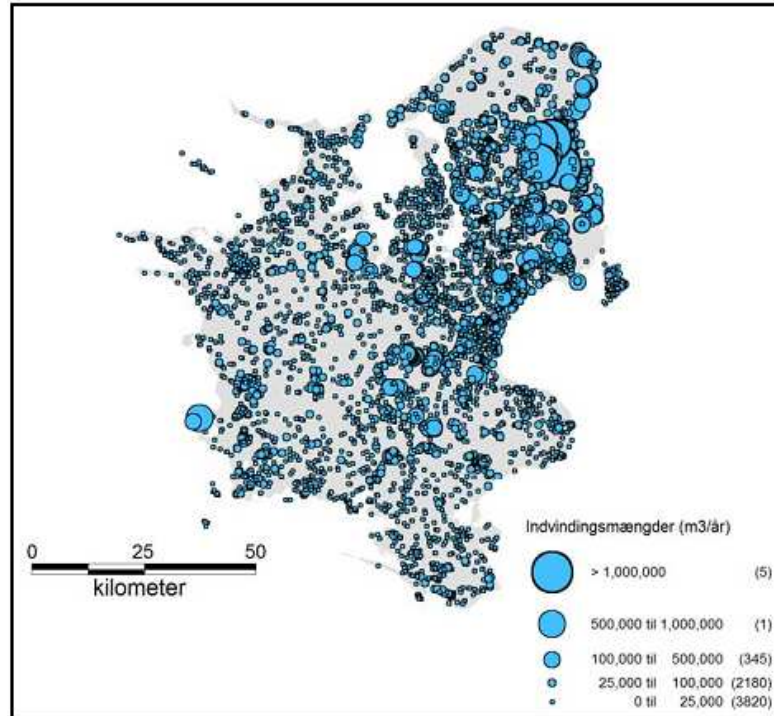
Habitatmodeller er en videreudvikling af de hydrauliske metoder og stiller yderligere krav. Integreerede modeller, som bruges i andre lande i forbindelse med f.eks. vandkraft, er langt mere datatunge og metodisk usikre, og de er endnu ikke udviklede til danske forhold. I udlandet bruges de typisk i forbindelse med store infrastrukturprojekter som vandkraft og på grund af de store krav til data, er det svært at forestille sig sådanne metoder anvendt i større udstrækning til regulering af indvinding.

1.8.2 Vurderingsmetode brugt på Sjælland

Sjællandsmodellen

Der er arbejdet videre med fastsættelse af kravværdier efter faste kriterier baseret på forholdene på Sjælland som beskrevet i Naturstyrelsens baggrundsnotat om be-

regningsgrundlag og kravværdier. Problemerne med minimumsvandføring er særligt store på Sjælland, fordi medianminimum er lav på grund af den lerede jord og på grund af den store vandindvinding i hovedstadsregionen.



Figur 17 *Middelindvinding på Sjælland (fra baggrundsnotat) angivet på boringsniveau i DK-modellen*

Formel 7

På Sjælland anvendes ”Formel 7” til fastsættelse af en ”ideel” medianminimum. Formel 7 kan betragtes som en simpel hydraulisk model. Metoden er udviklet af Orbicon for Miljøcenter Roskilde som forarbejde til vandplanerne og har spillet en stor rolle i forbindelse med overvejelserne omkring vandindvindingen på Sjælland.

Oprindeligt er metoden fastlagt på grundlag af undersøgelser af 6 sjællandske vandløb, der er i god økologisk tilstand og kun er lidt påvirkede af indvinding. Senere er den testet på yderligere 13 vandløb, hvoraf 4 blev sorteret fra, så modellen baserer sig på 15 sjællandske vandløb. Vandløbene er valgt af miljøcentrene, som lokaliteter, hvor den aktuelle økologiske tilstand på biologiske stationer i nærheden af vandføringsstationen vurderes at være så god, at vandføringen ikke er til hinder for opnåelsen af en god økologisk tilstand. Tilstanden er vurderet ud fra bedømmelser af smådyrsfaunaen (DVFI) og undersøgelser af fiskebestanden (tæthed og art).

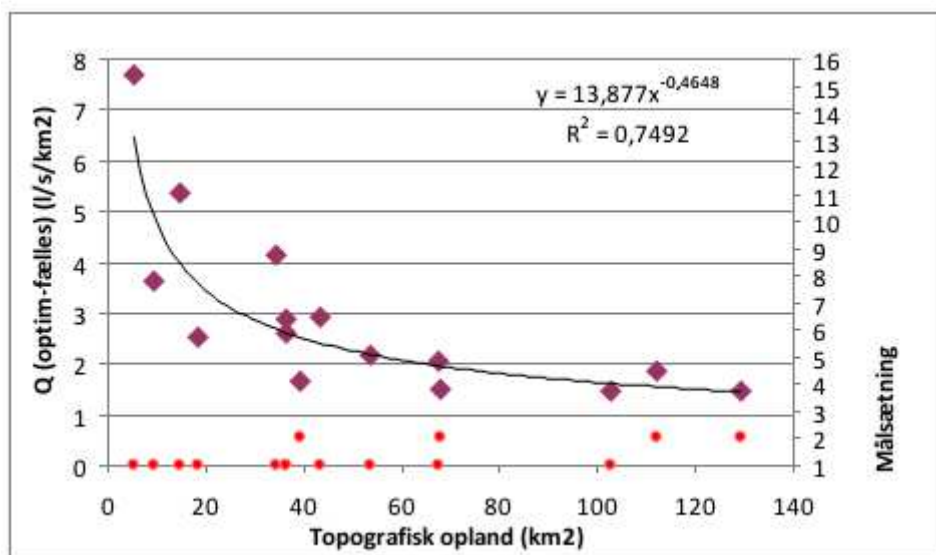
Først valgte man ”mindste optimale” værdier for strømhastighed og middelvanddybde for fisk, som angivet i Tabel 2.

Tabel 2 Valg af optimale værdier for vandhastighed og vanddybde for fisk (Orbicon 2008)

Valgte mindst optimale værdier af middelstrømhastighed (V-mid) og middelvanddybde (D-mid) for fisk ifølge (1)		
Målsætningstype	Middelstrømhastighed (V-mid), (m/s)	Middelvanddybde (D-mid), (m)
B1 (ørreder < 2 år)	> 0,2	> 0,2
B2 ((ørreder > 2 år)	> 0,15	> 0,3
B3 (karpefisk)	> 0,1	> 0,4

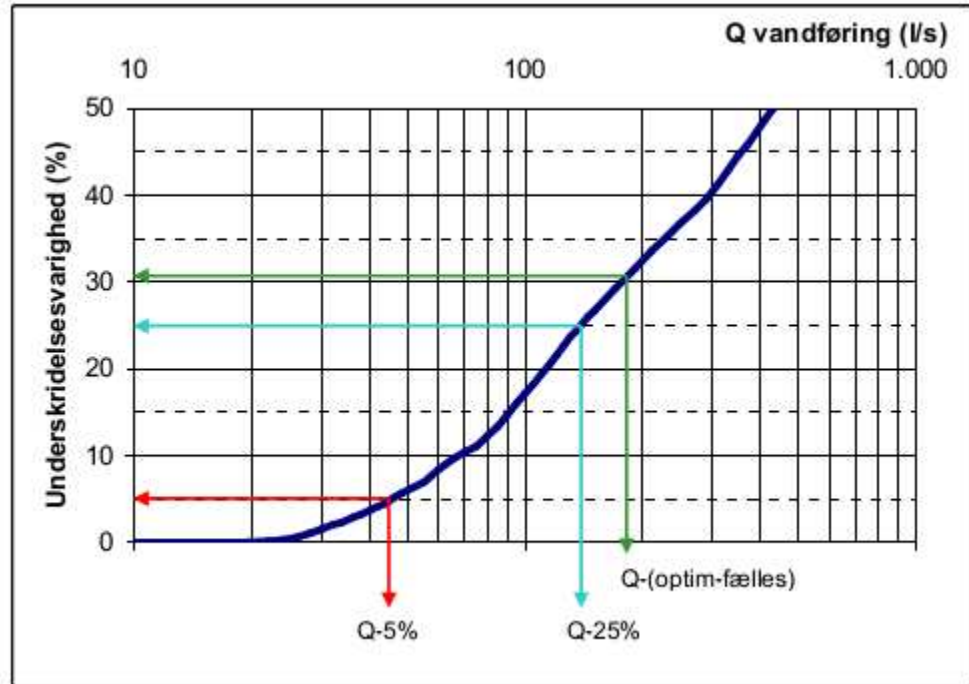
Herefter bestemte man ved måling de vandføringer, som netop gav disse hastigheder og middelvanddybder på de pågældende strækninger. Det geometriske middel af de to værdier blev betegnet som Q(optim-fælles) og udtrykker således den mindste vandføring, som ifølge et kvalificeret skøn giver gode vilkår for fisk.

Den optimale vandføring er relateret til oplandets størrelse, som vist for 15 oplande i Figur 18. Der er dog stor variation i de små vandløb, og metoden anvendes derfor ikke på oplande under 10 km². B1-oplandene (gydning) er typisk mindre end B2-oplandene (opvækst), der normalt er større og ligger længere nede i vandløbssystemet. Metoden er begrænset til vandløb med et fald på mindst 0,5 promille.



Figur 18 Sammenhængen med optimal vandføring og oplandsstørrelse (Orbicon 2008). De røde prikker angiver om målsætningen er B1 eller B2 (højre akse).

Den bestemte optimale vandføring blev herefter sammenlignet med den målte vandføring på stationerne. Det viste sig, at den optimale vandføring i de 6 vandløb blev underskredet i 41 % af tiden. Et eksempel på forholdet mellem de forskellige vandføringer er vist på Figur 19.



Figur 19 Varighedskurve fra Tryggevælde Å (fra Orbicon 2008). I dette tilfælde underskrides den ”optimale” vandføring i 31 % af tiden.

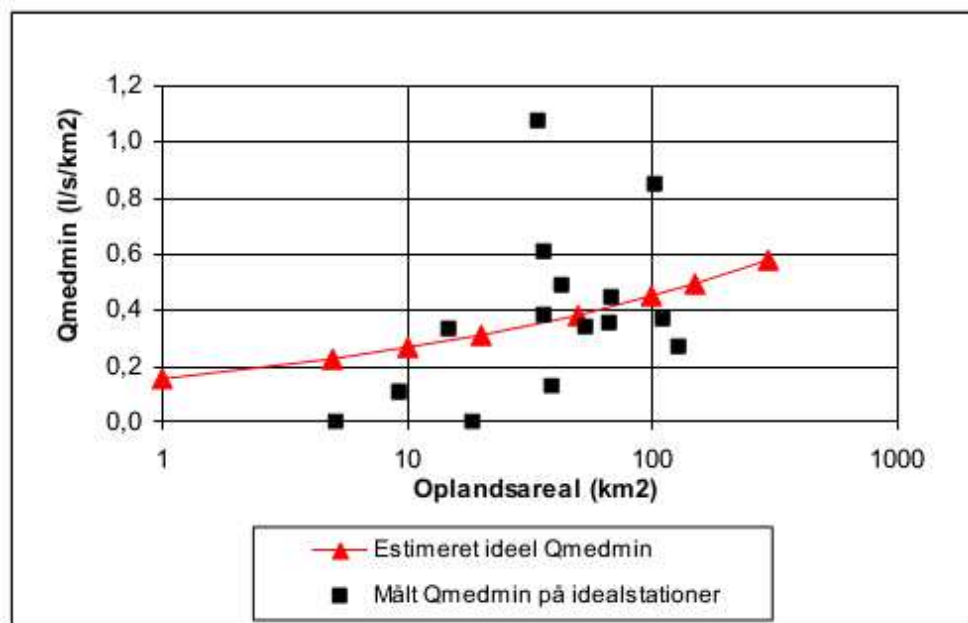
Da de 6 vandløb havde god tilstand og gode fiskebestande, er Q(optim-fælles) således højere end den økologisk acceptable minimumsvandføring.

Man beregnede herefter forholdet mellem Q(optim-fælles) og Q₂₅ og Q₅, dvs. de vandføringer, der bliver underskredet i hhv. 25 og 5 % af tiden. Disse forholdstal kaldes nøgletal og er fastsat på grundlag af de 6 vandløb, hvor Q(optim-fælles) var 1,8 gange Q₂₅ og 3,8 gange Q₅. En Q₅ vandføring, der er 1/3,8 gange Q(optim-fælles) (dvs. 26% af den ”optimale”), betragtes således som acceptabel.

Orbicon undersøgte herefter sammenhængen mellem forskellige karakteristiske afstrømninger for 19 vandløb og fandt f.eks., at medianminimum var 91 % af Q₅. Ved hjælp af forskellige korrelationer blev sammenhængen mellem den optimale vandføring og det totale topografiske oplandsareal fastlagt i Formel 7, der udtrykker kravet til medianminimum som funktion af oplandsareal:

$$Q_{\text{medmin}} = 0,1676 * \text{oplandsareal}^{0,2201} - 0,0128$$

idet Q er i l s⁻¹ km⁻² og oplandsareal i km². Dette er en meget simpel formel, der er let at anvende, da den eneste variabel er oplandsarealet.



Figur 20 Formel 7 sammenlignet med målt medianminimum for idealstationer (Orbicon 2008)

Figur 20 viser imidlertid, at variationen i målt medianminimum på de 15 stationer er meget stor, og at modellen ikke kan forklare den faktiske økologiske tilstand på stationerne. Således er der 5 stationer med et målt medianminimum, der ligger væsentligt under Formel 7s krav, og som alligevel har god økologisk tilstand og en god fiskebestand.

Vurdering af Formel 7

Udgangspunktet for Formel 7 har været at bestemme den ideelle vandføring ud fra måling af vandhastighed og dybde, hvilket igen siger noget om vandløbets skikkelse og fald. Formlen udtrykker formentlig en sammenhæng mellem vandløbenes skikkelse, faldforholdene og oplandstørrelse, når afstrømningsforhold og jordbund i øvrigt er nogenlunde ensartede, men Figur 20 viser, at formelen ikke udgør et godt grundlag for at fastlægge acceptabel økologisk påvirkning.

Dette skyldes formentlig, at Formel 7 er en hydraulisk model, der ikke tager hensyn til vandløbenes skikkelse og til vandløbets fysiske variation over en længere strækning. For fisk er det af stor betydning, om de kan trække hen til dybere dele af vandløbet, når vandføringen bliver meget lav, og dette element indgår ikke i modellen.

Samtidig ekstrapolerer modellen vurderingen ”ideelle” hydrauliske forhold til en vandføring, der kun er 24 % af den ”ideelle”². Man kan ikke vide, hvordan strømhastighed og dybdeforhold er ved de pågældende stationer ved denne lavere vandføring, da det naturligvis afhænger af vandløbenes profil, om der er ”passende” vandhastighed og dybde i vandløbet ved denne vandføring.

² Iflg Orbicons rapport er $Q(\text{optim-fælles}) = 3,8 \text{ gange } Q_5$ og Q_{medmin} er 91 % af Q_5

Modellen tager heller ikke hensyn til vigtige økologiske faktorer som bundsubstrat, grøde, beskygning og vedligeholdelse.

Problemerne med at anvende modellen bliver naturligvis større, jo mere vandløbene afviger fra de vandløb, der er brugt til at udvikle modellen, hvilket Orbicon også påpeger.

1.8.3 Vurderingsmetode brugt i Vestjylland

For hovedvandoplandene Nissum Fjord, Ringkøbing Fjord og Vadehavet har Naturstyrelsen brugt en anden metode, som beskrives i det følgende baseret på de tekniske baggrundsnotater (By- og Landskabsstyrelsen 2010).

Nuværende medianminima

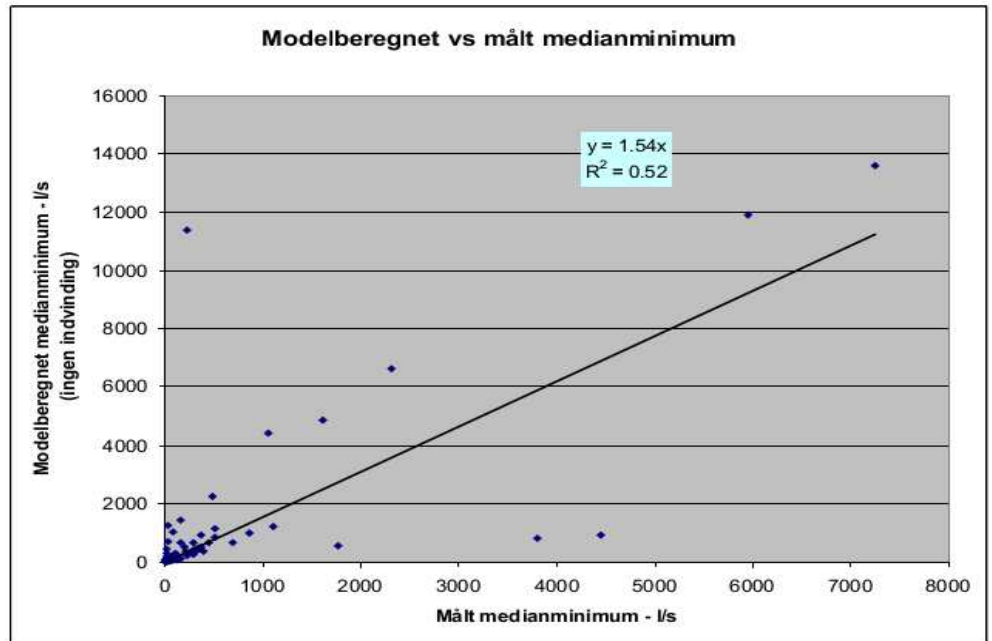
Medianminimumsvandføringerne i hovedvandoplandene Nissum Fjord, Ringkøbing Fjord og Vadehavet er beregnet ud fra referenceperioden 1971-2000. Data stammer fra hydrometriske stationer, hvor der er indsamlet tidsserier af varierende længde og for nogle stationer er tidsserierne forlænget ud fra mere veldokumenterede stationer. På basis af synkronmålinger i vandløb er der blevet beregnet medianminimumsværdier for mange små deloplande. Det har ikke været muligt at måle medianminimum i de kystnære dele af vandløbene, og der er derfor ikke knyttet medianminimumsdata til de kystnære arealer.

Oprindelige medianminima

For at vurdere de upåvirkede medianminimum er der foretaget modelsimuleringer med en numerisk model. Disse simuleringer blev foretaget for en årrække uden indvinding, og der blev herefter beregnet medianminimumsvandføringer for 77 punkter i vandløbene svarende til steder med målt medianminimum.

Resultatet af det målte medianminimum og det modelberegnete oprindelige medianminimum uden indvindingspåvirkning er vist på Figur 21. Som det fremgår af Figur 21 er det modelberegnete oprindelige medianminimum ca. 1,5 gange det målte, men korrelationen er ret dårlig, og nogle steder er der meget store afvigelser.

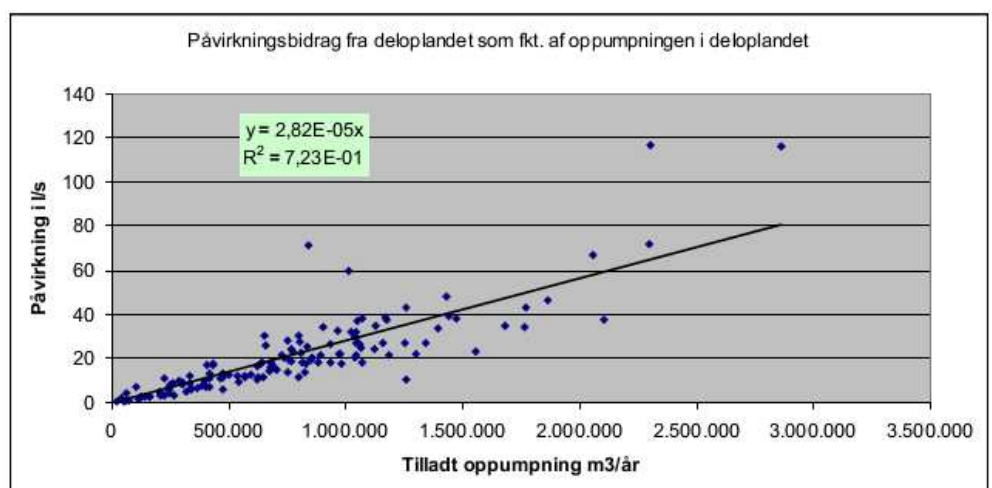
Under hensyntagen til usikkerhederne ved sådanne vurderinger besluttede Naturstyrelsen, at man ved beregningerne af påvirkningen skulle antage, at det upåvirkede medianminimum er dobbelt så stort som det nuværende.



Figur 21 Sammenhængen mellem målt og modelberegnet upåvirket medianminimum i 77 deloplande til Nissum Fjord (fra BLST 2010)

Beregning af indvindingens påvirkning af medianminimum

Det tidligere Ribe Amt har foretaget detaljerede analytiske beregninger af markvandingstilladelser på boringsniveau ved benyttelse af en modificeret Jenkins beregning kombineret med Stangs beregningsmetode. Data er summeret inden for deloplande af omtrent samme størrelse. I to deloplande i det tidligere Ribe Amt er der lavet en sammenligning mellem de detaljerede beregningerne på boringsniveau og resultaterne fra en numerisk grundvandsmodel for de samme områder og fundet god overensstemmelse mellem de to beregningsmetoder. Disse data er vist på Figur 22.



Figur 22 Regressionsplot, der viser sammenhængen mellem oppumpet grundvand og vandløbspåvirkning i en række deloplande. Data stammer fra det tidligere Ribe Amt

Figur 22 viser, at der er god overensstemmelse mellem den beregnede påvirkning og den tilladte indvinding, således at påvirkningen i l/s er $2,8 \cdot 10^{-5}$ gange den årlige

indvinding i $m^3/\text{år}$. Da omregningsfaktoren fra $m^3/\text{år}$ til l/s er $3,2 \cdot 10^{-5}$ betyder det, at påvirkningen af medianminimumsvandføringen er 88 % af den gennemsnitlige årlige indvinding. Dette tal kaldes ofte påvirkningsgraden.

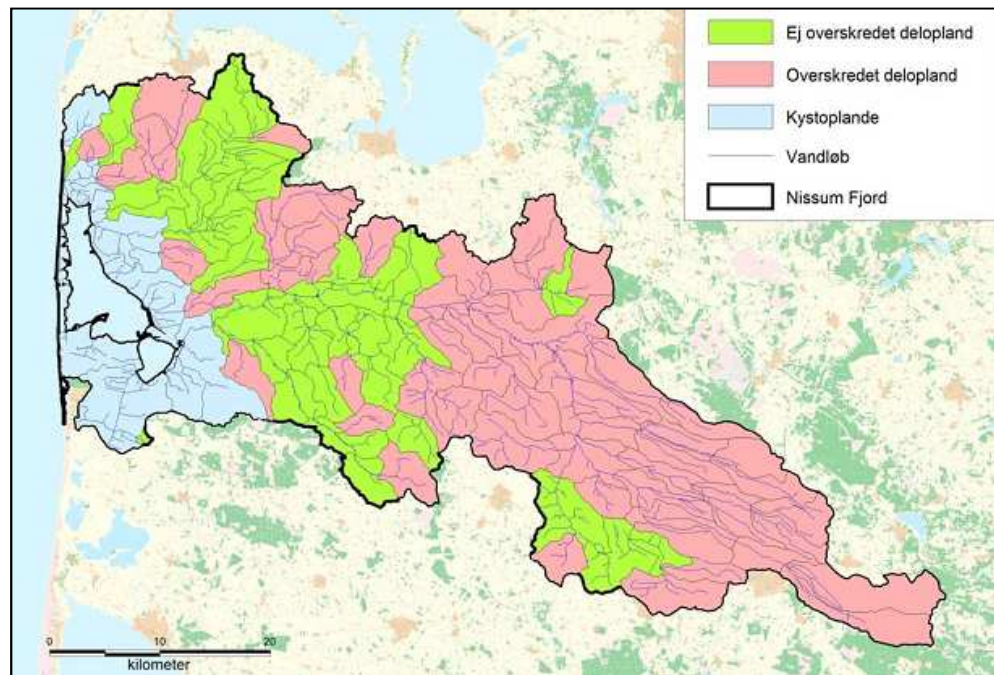
Det skal bemærkes, at denne korrelation ikke siger noget om den faktiske påvirkning af vandløbenes vandføring, men udelukkende viser, om beregningerne er indbyrdes konsistente.

I beregninger af den samlede påvirkning er taget hensyn til den direkte indvinding fra vandløbene, der ikke ledes tilbage i vandløbssystemet. En sådan type indvinding påvirker vandløbene kraftigere end grundvandsindvindingen og er sat til $6,4 \cdot 10^{-5}$ eller det 200 % af den gennemsnitlige årlige indvinding, idet det er antaget, at indvindingstilladelsen udnyttes i en koncentreret periode på 3 måneder hen over sommeren (dvs. 4 gange det årlige gennemsnit), men at typisk kun 50 % af indvindingstilladelsen anvendes, således at påvirkningsgraden bliver 200 %.

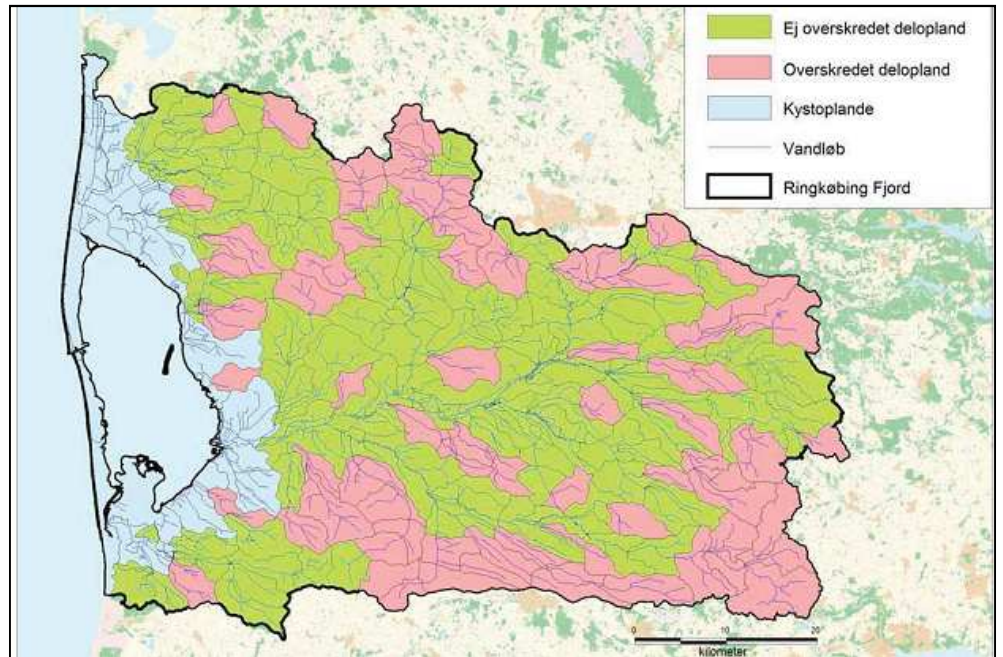
Udledningen af spildevand ikke er medregnet i beregningen af påvirkningen. Det er muligt, at spildevandsudledning lokalt kompenserer for indvindingens påvirkning af vandføringen, men dette er ikke nærmere undersøgt.

Vurdering af behovet for reduktion i vestjyske deloplande

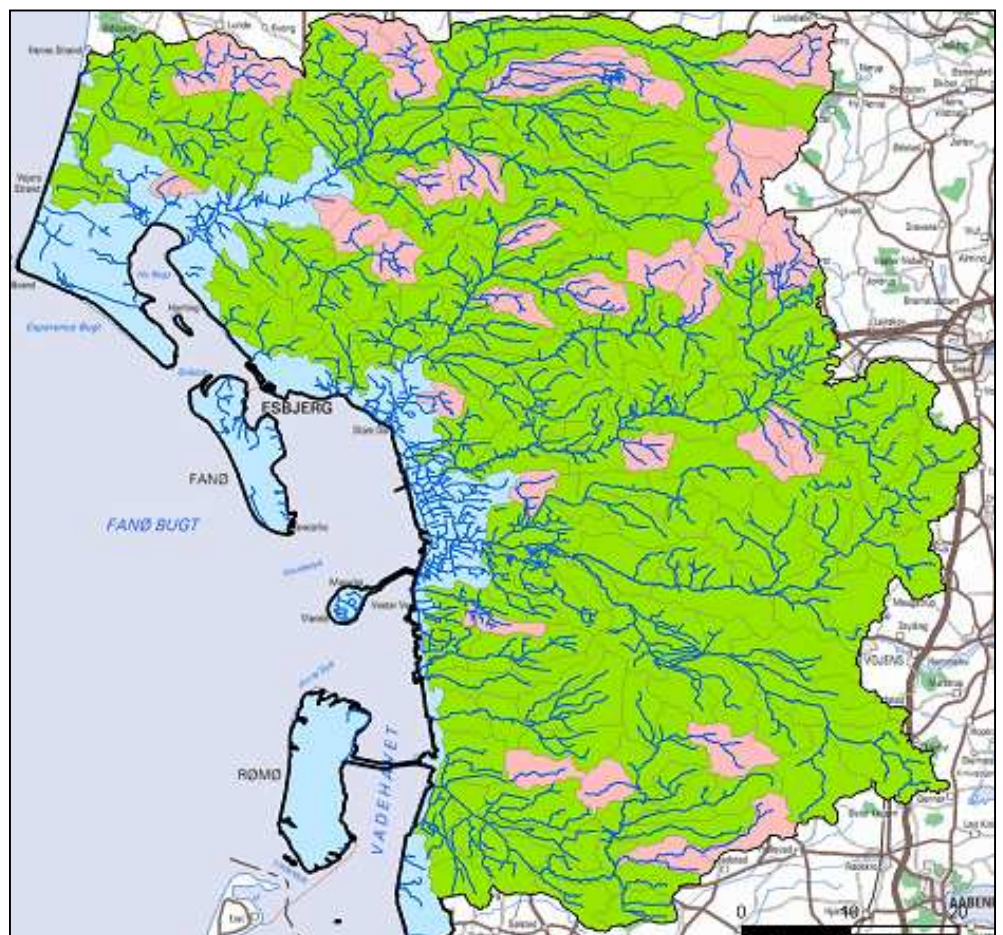
Indvindingens påvirkning er herefter summeret inden for hvert delopland, hvorefter den beregnede påvirkning er sammenholdt med oplandets vandløbsmålsætning. Ved beregningerne er der taget hensyn til den kumulative påvirkning ned gennem et vandløbssystem, således at vand der ”tages opstrøms” ikke er til rådighed nedstrøms i vandløbet. Resultaterne af denne beregning er vist i Figur 23 - Figur 25.



Figur 23 *Aktuelle indvindingstilladelser i forhold til acceptable minimumsvandføringer for Hovedvandopland Nissum Fjord (Naturstyrelsen, 2010a). I de røde deloplande er det således ifølge baggrundsnotet nødvendigt at reducere indvindingstilladelserne for at opfylde målet.*



Figur 24 Aktuelle indvindingstilladelser i forhold til acceptable minimumsvandføringer for Hovedvandopland Ringkøbing Fjord (Naturstyrelsen, 2010b)



Figur 25 Aktuelle indvindingstilladelser i forhold til acceptable minimumsvandføringer for Hovedvandopland Vadehavet (Naturstyrelsen, 2010c)

Forbehold i baggrundsnotaterne for de vestjyske hovedoplande

Baggrundsnotaterne for de tre vestjyske hovedoplande (Naturstyrelsen 2010a-c) beskriver den usikkerhed, der er forbundet med beregningerne og konkluderer, at fastsættelse af et evt. indsatsbehov ikke kan ske med tilstrækkelig sikkerhed. Blandt usikkerhederne kan bl.a. nævnes:

- › Beregningerne er udført på deloplandsniveau og inddrager ikke detaljerede oplysninger om lokal geologi, boringsdybde, afstand til vandløb mm.
- › Påvirkningen er beregnet ud fra indvindingen med samme faktor for alle tre hovedvandoplande uden hensyn til forskelle i geologi.
- › Beregningerne har anvendt en samlet målsætning for hele deloplandet, selvom vandløbsstrækningerne i oplandet kan have forskellige målsætninger.
- › Bestemmelse af oprindeligt medianminimum er behæftet med betydelig usikkerhed.

1.9 Konklusion af de generelle overvejelser

Der er enighed om at vandindvinding reducer vandføringen i specielt tørre somre og dermed påvirker vandløbenes økologi negativt. Imidlertid fremgår det af de foregående afsnit, at der trods den store viden om vandløb og grundvand i Danmark, er der meget stor usikkerhed vedrørende:

- › Den økologiske betydning af reduceret vandføring og dermed fastsættelse af en økologisk acceptabel reduktion
- › Fastlæggelse af nuværende medianminimum
- › Bestemmelse af oprindeligt medianminimum
- › Beregning af den reduktion i medianminimum en given indvinding medfører.

Uanset denne usikkerhed er det nødvendigt at finde et administrationsgrundlag, som må basere sig på den bedste tilgængelige viden om, hvordan indvindingen påvirker vandløbenes økologi.

Teoretisk set ville det være bedre at basere reguleringen på en habitatmodel, men det er svært at forestille sig, hvordan en sådan kompliceret model skulle kunne anvendes i praksis til administration af vandindvindingstilladelser, og usikkerheden ville næppe blive mindre nu. På kort sigt er det således svært at finde et realistisk alternativ til regulering baseret på beregnet påvirkning af medianminimum.

Man kan dog overveje at anvende retningslinjerne fleksibelt, således at man kan afvige fra retningslinjernes krav til maksimal påvirkning efter en konkret vurdering af den påvirkede strækning. For de vandløbsstrækninger, hvor det skønnes, at der er behov for at reducere indvindingen for at opfylde den økologiske målsætning, kunne man vurdere, om det er muligt at opnå den krævede vandløbskvalitet ved at

skabe større variation i de fysiske forhold og ændre vedligeholdelsen og således forbedre habitatet uden at reducere den nuværende indvinding.

2 Hydrogeologiske forhold

2.1 Modelopstilling og -scenarier

Lokale hydrogeologiske forhold har stor betydning for, hvorledes en enkelt vandindvindingsboring påvirker et vandløb. Der skal ikke meget lagdeling eller lerindslag i de øverste jordlag til, før påvirkningen fordeles over et større område og forsinkes i forhold til den periode, der vandes.

Vi har undersøgt dette på grundlag af data for et opland til Tim Å. Resultaterne præsenteres her, og en uddybet beskrivelse er medtaget som Bilag A. Der er opstillet en integreret, hydrologisk oplandsmodel for Tim Å. Modellen er baseret på flere forskellige datakilder.

Modellen er anvendt til at belyse følgende problemstillinger:

- › Hvad er betydningen af de hydrogeologiske forhold i det lokale område mellem en boring og et vandløb? Dette forhold er belyst kvantitativt ved at gennemføre modelberegninger med forskellige geologiske forudsætninger. Basis-scenariet er baseret på eksisterende geologiske forhold, og der er gennemregnet situationer, hvor der (hypotetisk, men realistisk) indlægges et begrænsende lerlag over indvindingsborings filtre, så kontakten til vandløb reduceres. Der er gennemregnet flere forskellige scenarier med forskellige hydrauliske parametre af lerlaget.
- › Hvad er betydningen af kontakten mellem grundvandsmagasinet og vandløbet? Samme beregninger som ovenfor er gennemført uden lerlag, men med en varierende permeabilitet i vandløbsbund for at undersøge effekten af dette.
- › Hvad betyder det, at påvirkningen fra markvanding ikke sker momentant i vandløbet, men har en vis forsinkelse, som hænger sammen med dels boringens afstand fra vandløbet dels de hydrogeologiske forhold i det lokale område? I visse områder vil påvirkningen ske længe efter oppumpning og måske på et tidspunkt af året, hvor der er rigeligt vand i vandløbet. Der er gennemregnet et antal beregninger, hvor indvindingsens tidsrum varieres og afstanden mellem vandløb og indvindingsboring varieres.

I første omgang var der lagt vanding ind i alle modelscenarier. Det oppumpede vand blev tildelt til et areal svarende til, at der vandes med 27 mm én dag om ugen i hele vandingsperioden (3 måneder). Der blev regnet med et fordampningstab på 10%. Med en oppumpning på 50 m³/time svarer dette til, at et område på 30 ha vandes med den oppumpede mængde. Vandingen er vurderes fornuftig, da det forventes, at der vandes med f.eks. 30 mm en gang om ugen. I virkeligheden vandes der efter behov i forhold til nedbør i perioden. Det viste sig dog, at vandingen overskyggede effekterne ved oppumpning så meget, at modelkonceptet blev lavet om. Dette skyldtes primært, at de valgte år var temmelig våde, og derfor var det reelle behov for vanding ikke særlig højt.

I anden omgang er det derfor kun undersøgt, hvad oppumpningen betyder på afstrømningen i oplandet, dvs. der er ikke vandet med det vand, som indvindes.

Som baggrund for at undersøge betydningen af oppumpningsperioden er der i nedenstående Tabel 3 vist, hvornår minimumsvandføringen indtræffer i de forskellige vandløbspunkter, der er undersøgt.

Tabel 3 *Oversigt over, hvornår minimumsvandføringen registreres de forskellige år. Kolonnerne er forskellige punkter (stationer) på vandløbet.*

Dato for årets vandføringsminima	7030	7910	8790	9670	10550	11420	12270
Minimum 2000	10-05-2000	10-05-2000	10-05-2000	10-05-2000	10-05-2000	10-05-2000	02-07-2000
Minimum 2001	06-07-2001	06-07-2001	06-07-2001	06-07-2001	06-07-2001	08-07-2001	08-07-2001
Minimum 2002	09-06-2002	09-06-2002	09-06-2002	09-06-2002	09-06-2002	09-06-2002	09-06-2002

I år 2000 falder minimumsvandføringen i maj måned (dog i visse vandløbspunkter i starten af juli), i år 2001 falder den i juli og i år 2002 falder den i juni. Disse tidspunkter er formentlig atypiske, da minimumsvandføringer normalt indtræffer i sensommeren. Dette forhold hænger formentlig sammen med, at de tre år, der indgår i undersøgelsen alle havde relativt våde somre.

Nedenstående Tabel 5 og Tabel 4 indeholder en oversigt over de gennemførte scenarier. Scenarierne er nummereret med 5 cifre hvor:

- › første ciffer angiver, om der er indvinding eller ej (0, 1, 2: 0, 50, 100 m³/time)
- › andet ciffer angiver, hvor langt fra vandløb indvindingsboringen ligger (1, 2, 5, 7, 9 = 100 m, 200 m osv.)
- › tredje ciffer angiver, om der er lerlinse eller ej (0, 1, 2, 3: ingen, $k=1e^{-6}$, $1e^{-7}$, $1e^{-8}$ m/s)
- › fjerde ciffer angiver, hvor stor lækagen i vandløbsbund er (1, 2, 3: $k=1e^{-6}$, $1e^{-7}$, $1e^{-8}$ m/s)
- › femte ciffer angiver oppumpningsperioden (0, 1, 2, 3: ingen, maj/jun/jul, jun/jul/aug, jul/aug/sep).

Som det ses, er der tale om 6 basis-scenarier uden oppumpning og 19 modelscenarier med oppumpning. En indvinding på 50 m³/time kan omregnes til 13,9 l/s. Der indvindes ud for et vandløbspunkt, som er godt 7 km nedstrøms i vandløbet i forhold til dets udspring.

Tabel 4 *Oversigt over de gennemførte modelscenarier med lerlinse*

Scenarium	Boringens afstand til åen (m)	Lerlinse K_h (m/s)	Lækage i vandløb (s ⁻¹)	Oppumpningsperiode
00110	-	1×10^{-6}	$1,56 \times 10^{-6}$	-
00210	-	1×10^{-7}	$1,56 \times 10^{-6}$	-
00310	-	1×10^{-8}	$1,56 \times 10^{-6}$	-
12112	200	1×10^{-6}	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug

12212	200	1×10^{-7}	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug
12312	200	1×10^{-8}	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug

Tabel 5 *Oversigt over de gennemførte modelscenarier uden lerlinse*

Scenarium	Boringens afstand til åen (m)	Lerlinse K_h (m/s)	Lækage i vandløb (s^{-1})	Oppumpningsperiode
00010	-	-	$1,56 \times 10^{-6}$	-
00020	-	-	$1,56 \times 10^{-7}$	-
00030	-	-	$1,56 \times 10^{-8}$	-
12012	200	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug
12022	200	-	$1,56 \times 10^{-7}$	jun/jul/aug
12032	200	-	$1,56 \times 10^{-8}$	jun/jul/aug
11012	100	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug
12012	200	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug
13012	300	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug
15012	500	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug
17012	700	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug
19012	900	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug
11011	100	-	$1,56 \times 10^{-6}$	maj/jun/jul
12011	200	-	$1,56 \times 10^{-6}$	maj/jun/jul
13011	300	-	$1,56 \times 10^{-6}$	maj/jun/jul
11013	100	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jul/aug/sep
12013	200	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jul/aug/sep
13013	300	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jul/aug/sep
22012	200	-	$1,56 \times 10^{-6}$	jun/jul/aug

2.2 Beregningsresultater

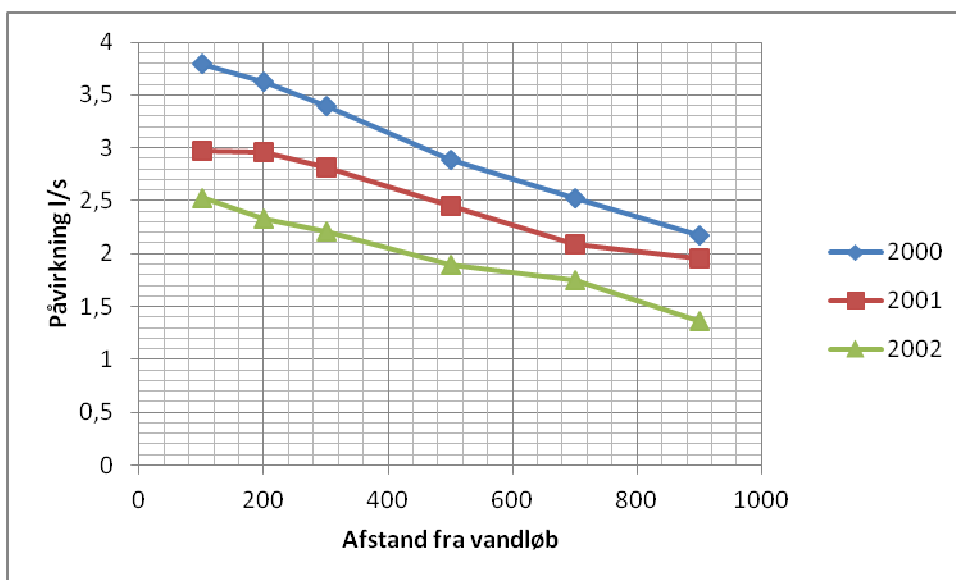
Resultater i form af simuleret afstrømning på daglig basis fra flere nedstrøms beliggende vandløbspunkter er analyseret ved at se på forskellen mellem basissituationen og den påvirkede situation.

Der er i mange tilfælde set på en term, som kaldes påvirkningsgraden, som udtrykker forholdet mellem den indvundne vandmængde og den reduktion i minimumsvandføring, der sker i vandløbet. Dvs. de tal, som vises i tabellerne er udregnet som % af 13,9 l/s.

2.2.1 Vurdering af effekt af afstand mellem indvinding og vandløb

Tabel 6 Påvirkningen (ændring i årlig minimumsvandføring mellem basisscenario og modelscenarie l/s) i vandløbspunkter nedstrøms indvindingsboringen. Vurdering af effekt af afstand mellem indvinding og vandløb

Scenarium	År	Vandløbspunkt (afstand fra udspring (m))						
		7030	7910	8790	9670	10550	11420	12270
11012	2000	0,7	1,7	1,8	1,8	2,3	3,6	3,8
11012	2001	0,9	2,4	2,7	2,9	2,9	3,0	3,0
11012	2002	0,8	2,2	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5
12012	2000	0,8	1,7	1,8	1,9	2,2	3,4	3,6
12012	2001	1,0	2,4	2,8	2,9	3,0	3,0	3,0
12012	2002	0,6	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
13012	2000	0,6	1,5	1,6	1,7	1,9	3,2	3,4
13012	2001	0,8	2,2	2,5	2,7	2,7	2,8	2,8
13012	2002	0,6	1,9	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2
15012	2000	0,6	1,2	1,3	1,3	1,4	2,7	2,9
15012	2001	0,7	1,9	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5
15012	2002	0,5	1,6	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9
17012	2000	0,5	1,0	1,1	1,1	1,1	2,3	2,5
17012	2001	0,6	1,6	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1
17012	2002	0,5	1,4	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
19012	2000	0,4	0,8	0,9	1,0	1,0	1,9	2,2
19012	2001	0,6	1,4	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0
19012	2002	0,3	1,0	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4



Figur 26 Grafisk fremstilling af påvirkning som funktion af afstanden fra vandløbet (ved 12270)

På basis af beregningsresultaterne vist i Tabel 6 og den grafiske fremstilling i Figur 26 kan der udledes følgende konklusioner:

- 1 Påvirkningsgraden er maksimalt 27% og optræder ved en oppumpning 100 m fra vandløbet i ét ud af tre år. I de andre 2 år, som undersøges, er påvirkningsgraden maksimalt 22% og 18%.
- 2 Der er ret store forskelle i påvirkningsgraden mellem de undersøgte år.
- 3 Påvirkningen er først fuldt udviklet 5 km nedstrøms indvindingsboringen.
- 4 Påvirkningen falder med stigende afstand mellem vandløb og indvindingsboring. Påvirkningen fra en boring, som ligger 900 m fra vandløbet er ca. 60% af påvirkningen fra en boring, som ligger 100 m vandløbet.
- 5 Påvirkningsgraden er maksimalt 16% ved oppumpning 900 m fra vandløbet. I de andre 2 år, som undersøges, er påvirkningsgraden maksimalt 14% og 10%.

2.2.2 Vurdering af effekt af ledningsevne af vandløbsbund

Tabel 7 Påvirkningen (ændring i årlig minimumsvandføring mellem basisscenario og modelscenarie l/s) i vandløbspunkter nedstrøms indvindingsboringen. Vurdering af effekt af ledningsevnen af vandløbsbund

Scenarium	År	Vandløbspunkt (afstand fra udspring (m))						
		7030	7910	8790	9670	10550	11420	12270
12012	2000	0,8	1,7	1,8	1,9	2,2	3,4	3,6
12012	2001	1,0	2,4	2,8	2,9	3,0	3,0	3,0
12012	2002	0,6	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
12022	2000	0,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
12022	2001	0,8	2,1	2,4	2,5	2,6	2,6	2,6
12022	2002	0,6	1,9	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3
12032	2000	0,8	1,7	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0
12032	2001	0,9	2,2	2,5	2,6	2,7	2,7	2,7
12032	2002	0,6	1,9	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2

På basis af beregningsresultaterne vist i Tabel 7 kan der udledes følgende konklusioner:

- 1 Påvirkningen falder generelt med faldende kontakt mellem vandløb og grundvand (ledningsevne i vandløbsbund). I nogle år er faldet markant (fra 3,6 l/s til 2,0 l/s ved en reduktion på 2 dekader), mens faldet i andre år er meget mindre markant (fra 2,3 l/s til 2,2 l/s).

2.2.3 Vurdering af effekt af lerlinsen ledningsevne

Tabel 8 *Påvirkningen (ændring i årlig minimumsvandføring mellem basisscenarie og modelscenarie l/s) i vandløbspunkter nedstrøms indvindingsboringen. Vurdering af effekt af lerlinse ledningsevne*

Scenarium	År	Vandløbspunkt (afstand fra udspring (m))						
		7030	7910	8790	9670	10550	11420	12270
12112	2000	0,2	0,6	0,6	0,6	1,9	2,0	2,0
12112	2001	0,9	1,4	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7
12112	2002	0,6	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
12212	2000	1,4	1,5	1,5	1,1	1,1	1,3	1,3
12212	2001	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	0,0
12212	2002	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
12312	2000	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	1,0	1,0
12312	2001	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9
12312	2002	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5

På basis af resultaterne vist i Tabel 8 kan der drages følgende konklusioner:

- 1 Der er en tydelig effekt af tilstedeværelsen af en lerlinse i oplandet. Påvirkningen er generelt noget mindre med lerlinse end uden. Således er den maksimale påvirkningsgrad kun 14% med lerlinse sammenlignet med 26% uden. Der er relativ stor forskel mellem de forskellige år. For den samme lerlinse er påvirkningsgraden 12% og 8% i de andre 2 år, som er undersøgt.
- 2 Påvirkningen falder generelt med faldende ledningsevne i lerlinsen. Der er et fald på ca. 50% ved en reduktion på 2 dekader.
- 3 En enkelt kombination af år og ledningsevne falder udenfor. I dette år sker der tilsyneladende en stigning i vandføringen mellem situationen med og uden oppumpning. Der kan ikke gives nogen logisk forklaring på dette og dette scenarium udelades af konklusionerne.

2.2.4 Vurdering af effekt oppumpningsperiode

Tabel 9 *Påvirkningen (ændring i årlig minimumsvandføring mellem basisscenarie og modelscenarie l/s) i vandløbspunkter nedstrøms indvindingsboringen. Vurdering af effekt oppumpningsperiode. Afstand mellem boring og vandløb = 100 m*

Scenarium	År	Vandløbspunkt (afstand fra udspring (m))						
		7030	7910	8790	9670	10550	11420	12270
11011	2000	1,1	2,7	2,9	3,0	3,1	3,1	3,1
11011	2001	0,9	2,0	2,4	2,6	2,7	2,7	2,7
11011	2002	0,9	2,5	2,8	3,0	3,0	3,0	3,0
11012	2000	0,7	1,7	1,8	1,8	2,3	3,6	3,8
11012	2001	0,9	2,4	2,7	2,9	2,9	3,0	3,0
11012	2002	0,8	2,2	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5
11013	2000	0,3	0,4	0,4	0,4	1,5	2,7	2,9
11013	2001	0,7	1,9	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2
11013	2002	0,3	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1

Tabel 10 Påvirkningen (ændring i årlig minimumsvandføring mellem basisscenarie og modelscenarie l/s) i vandløbspunkter nedstrøms indvindingsboringen. Vurdering af effekt oppumpningsperiode. Afstand mellem boring og vandløb = 200 m

Scenarium	År	Vandløbspunkt (afstand fra udspring (m))						
		7030	7910	8790	9670	10550	11420	12270
12011	2000	1,0	2,5	2,8	2,8	2,9	2,9	3,1
12011	2001	0,9	2,1	2,5	2,7	2,8	2,7	2,7
12011	2002	0,9	2,5	2,8	2,9	3,0	3,0	3,0
12012	2000	0,8	1,7	1,8	1,9	2,2	3,4	3,6
12012	2001	1,0	2,4	2,8	2,9	3,0	3,0	3,0
12012	2002	0,6	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
12013	2000	0,1	0,1	0,0	0,0	0,8	2,0	2,2
12013	2001	0,5	1,4	1,5	1,6	1,6	1,2	1,2
12013	2002	0,1	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Tabel 11 Påvirkningen (ændring i årlig minimumsvandføring mellem basisscenarie og modelscenarie l/s) i vandløbspunkter nedstrøms indvindingsboringen. Vurdering af effekt oppumpningsperiode. Afstand mellem boring og vandløb = 300 m

Scenarium	År	Vandløbspunkt (afstand fra udspring (m))						
		7030	7910	8790	9670	10550	11420	12270
13011	2000	1,0	2,4	2,7	2,8	2,8	2,9	3,1
13011	2001	0,8	2,0	2,4	2,6	2,7	2,6	2,6
13011	2002	0,8	2,3	2,7	2,8	2,9	2,9	2,9
13012	2000	0,6	1,5	1,6	1,7	1,9	3,2	3,4
13012	2001	0,8	2,2	2,5	2,7	2,7	2,8	2,8
13012	2002	0,6	1,9	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2
13013	2000	0,3	0,4	0,4	0,4	1,2	2,4	2,6
13013	2001	0,7	1,8	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1
13013	2002	0,2	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

På basis af beregningsresultaterne vist i Tabel 9, Tabel 10 og Tabel 11 kan der drages følgende konklusioner:

- 1 I nogle år betyder oppumpningsperioden ikke særlig meget, f.eks. i år 2000, hvor der er en forskel påvirkningen er 3,1; 3,4 og 2,6 l/s ved de forskellige oppumpningsperioder og en oppumpning 100 m fra vandløbet. I andre år har oppumpningsperioden meget stor betydning; f.eks. i år 2002, hvor påvirkningen er 2,2; 2,9 og 0,9 l/s ved en oppumpning 300 m fra vandløbet.
- 2 Forskellen mellem påvirkningen fra år til år er markant anderledes ved en oppumpningsperioden jul/aug/sep i forhold til de andre 2 oppumpningsperioder.

Ovenstående hænger naturligvis sammen med, på hvilket tidspunkt minimumsvandføringen indtræffer de enkelte år. Beregningerne har vist, at der ikke sker en forskydning af tidspunktet for, hvornår minimumsvandføringen indtræffer undtagen i station 11420, som skifter fra 10/5 til 2/7 i år 2000. Dvs. når der i år 2002 simuleres et fald i minimumsvandføringen på 0,9 l/s (hvor denne indtræffer 9/6),

selv om oppumpningsperioden er jul/aug/sep, så betyder det, at der er en (lille) effekt fra det foregående års oppumpning.

2.2.5 Vurdering af effekt af indvindingsmængde

Tabel 12 Påvirkningen (ændring i årlig minimumsvandføring mellem basisscenario og modelscenarie l/s) i vandløbspunkter nedstrøms indvindingsboringen. Vurdering af effekt af indvindingsmængde

Scenarium	År	Vandløbspunkt (afstand fra udspring (m))						
		7030	7910	8790	9670	10550	11420	12270
12012	2000	0,8	1,7	1,8	1,9	2,2	3,4	3,6
12012	2001	1,0	2,4	2,8	2,9	3,0	3,0	3,0
12012	2002	0,6	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
22012	2000	1,3	3,2	3,4	3,4	5,9	7,2	7,4
22012	2001	2,0	4,8	5,5	5,8	5,9	5,9	5,9
22012	2002	1,5	4,0	4,4	4,5	4,6	4,6	4,6

På basis af beregningsresultaterne vist i Tabel 12 kan der drages følgende konklusioner:

- 1 Påvirkning stiger (næsten) lineært med indvinding, dvs. påvirkningsgraden er uændret.

2.3 Samlet konklusion af modelleringen

Betydningen af en oppumpning til markvanding i forhold til påvirkning af minimumsvandføring er undersøgt i et opland beliggende på en hedeslette i Ringkøbing Fjords opland. Oplandet må forventes at være repræsentativt for mange lignende oplande. Påvirkningen er undersøgt for 3 (våde) år, da dette var, hvad der forelå data for. På basis af de gennemførte modelberegninger kan der drages følgende overordnede konklusioner:

- › Påvirkningen af minimumsvandføringen er maksimalt 3,8 l/s. Dette skal ses i forhold til, at indvindingen udgør 13,9 l/s og påvirkningsgraden - udtrykt som forholdet mellem ændringen i minimumsvandføringen og indvindingen - kan derfor beregnes til maksimalt 27 %.
- › Indvindingsboringens placering (afstand til) i forhold til vandløbet har tydelig betydning for påvirkningen. Dette er undersøgt ved at variere afstanden mellem boring og vandløb fra 100 til 900 m. Der er en næsten lineær sammenhæng mellem påvirkningen og afstanden til vandløbet; der er således 80 % større påvirkning ved placering af indvindingsboringen 100 m fra vandløbet i forhold til 900 m fra vandløbet.
- › De hydrogeologiske forhold tæt på vandløbet har en tydelig betydning for påvirkningen. Det er undersøgt, hvad en variation i kontakten mellem grundvand og vandløb udtrykt ved vandløbsbundens hydrauliske egenskaber betyder. Ved at variere den hydrauliske ledningsevne med en faktor 100 - den er stadig

inden for typiske værdier - er der en variation i påvirkningen på op til en faktor 1,8.

- › Det har ligeledes tydelig betydning, hvordan de hydrogeologiske forhold generelt er i det område, hvor indvindingen sker. Dette er undersøgt ved teoretisk at indlægge en lerlinse i oplandet over det lag, hvorfra der pumpes. Påvirkningen er generelt noget mindre med lerlinse end uden. Således er den maksimale påvirkningsgrad kun 14 % med lerlinse sammenlignet med 26% uden. Der er relativ stor forskel mellem de forskellige år. For den samme lerlinse er påvirkningsgraden 12 % og 8% i de andre 2 år, som er undersøgt. Påvirkningen falder generelt med faldende ledningsevne i lerlinsen. Der er et fald på ca. 50 % ved en reduktion på 2 dekader.
- › Det er undersøgt, hvilken betydning oppumpningsperioden har på påvirkningen af vandføringen i vandløbet ved at variere mellem maj/jun/jul, jun/jul/aug og jul/aug/sep. Det viser sig, at oppumpningsperioden ikke har betydning for, hvornår minimumsvandføringen indtræffer. Oppumpningsperioden har mindre betydning på størrelsen af påvirkningen; således ses der en forskel på op til 25 % af påvirkningsgraden afhængig af pumpeperioden. Det skal noteres, at tidspunktet for minimumsvandføring indtræffer tidligt (maj/jul/jun i de 3 undersøgte år).
- › Til sidst er betydningen af oppumpningsmængden undersøgt ved at gennemregne en situation med dobbelt indvinding. Dette giver anledning til en fordobling af påvirkningsgraden.

Et af de vigtige resultater i forhold til ovenstående konklusioner er, at påvirkningsgraden er mindre end forventet. Det er maksimalt 27 % af indvindingen som fragår minimumsvandføringen. Dette tal vil ligeledes - alt andet lige - blive endnu mindre, hvis der vandes med det indvundne vand, hvorved der sker en vis tilbageførsel til vandløbet.

En anden vigtig pointe er, at påvirkningen indtræffer relativt langt nedstrøms vandløbet i forhold til placeringen af indvindingsboringerne. Dette betyder, at effekten af oppumpningen dels spredes ud over oplandet dels spredes ud over tid og derfor ikke påvirker den helt aktuelle vandføringen lokalt.

En tredje hovedkonklusion er, at de lokale og regionale hydrogeologiske forhold har stor betydning for påvirkningen fra oppumpning. Dette betyder, at det kan være svært at give generaliserede retningslinjer for, hvordan påvirkning skal beregnes og dermed for, hvordan indvindingstilladelser skal gives.

Det må forventes, at ovenstående hovedkonklusioner er valide for alle klimatiske forhold, men det vil være sandsynligt, at:

- 1 Indarbejdelse af vanding med det oppumpede vand vil have betydning for påvirkningsgradens størrelse (den vil blive mindre)
- 2 Tørre somre vil have en indflydelse, og formentlig føre til større påvirkninger.

COWI anbefaler på denne baggrund, at der arbejdes videre, specielt med modellering, hvor disse forhold inddrages i hovedkonklusionerne.

3 Referencer

By- og Landskabsstyrelsen (2010a). Teknisk baggrundsnotat til Vandplan 1.4 Nissum Fjord

By- og Landskabsstyrelsen (2010b). Teknisk baggrundsnotat til Vandplan 1.8 Ringkøbing Fjord

By- og Landskabsstyrelsen (2010c). Teknisk baggrundsnotat til Vandplan 1.10 Va-dehavet

By- og Landskabsstyrelsen (2010d). Retningslinjer for udarbejdelse af indsatsprogrammer. Bilag 9: Vejledning i vurdering af tilstand og fastlæggelse af mål for vandløb. Vejledning vedrørende vandindvindings påvirkning af vandløb. Version 5. december 2010

Dahl, M., Harrar, W.G., Henriksen, H.J. og Knudby, C.J. (1998). Integrated hydrological modelling of freshwater resources in Denmark – Distribution of aquifer-river exchange parameters. Proceeding fra 'Gambling with Ground-water – Physical, Chemical, and Biological Aspects of Aquifer-Stream Relations', Minnesota, USA som citeret i Hydrokemisk interaktion mellem grundvand og overfladevand (HYGRO), Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 10, 2003

Danmarks Miljøundersøgelser (2000): Afstrømningsforhold i danske vandløb. Faglig rapport fra DMU, nr. 340

Danmarks Miljøundersøgelser (2004): Anvendelse af Vandrammedirektivet i danske vandløb. Faglig rapport fra DMU, nr. 499

Højbjerg, A.L., Nyegaard, P., Stisen, S., Troldborg, L., Ondracek, M., Christensen, B.S.B. (2010). DK-model 2009. Modelopstilling og kalibrering for Midtjylland. GEUS rapport 2010/78

Karlsson, I. B., Sonnenborg, T.O. og Høgh Jensen, K. (2010): Hydrologiske konsekvenser af historiske og fremtidige klimatiske ændringer i Vestjylland. Geoforum Perspektiv nr. 17, s. 32-39

Miljøcenter Roskilde (2009): Fastsættelse af kravværdier for økologisk acceptable minimumsvandføringer i vandløb på Sjælland. Notat. 26. januar 2009.

Miljøstyrelsen (2003): Hydrokemisk interaktion mellem grundvand og overfladevand (HYGRO), Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 10

Naturstyrelsen (2002): Retningslinjer for udarbejdelse af indsatsprogrammer vandplaner 2010 – 2015. Maj 2002

Naturstyrelsen (2011). Udvidet hydrostratigrafisk model for Staby-Vildbjerg kortlægningsområde. Projektrapport udarbejdet af COWI.

Naturstyrelsen (2012a). Grundvandsmodel for Staby-Vildbjerg kortlægningsområde. Projektrapport udarbejdet af COWI.

Naturstyrelsen (2012b): Retningslinjer for udarbejdelse af indsatsprogrammer. Vandplaner 2010 – 2015. Maj 2012

Naturstyrelsen (2012c): Præsentation af Ole Ejlskov Jensen, 28. september 2012

Ringkøbing Skjern kommune (2010). Oversvømmelse og klimatilpasning. Projekt-rapport udarbejdet af COWI.

Bilag A Udvikling af oplandsmodellen

ADRESSE COWI A/S
Parallevej 2
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

PROJEKTNR.
DOKUMENTNR. 1
VERSION 2
UDGIVELSESDATO Januar 2013
UDARBEJDET ANRE, BOC, MUM
KONTROLLERET BEVI
GODKENDT ANRE

1 Indledning

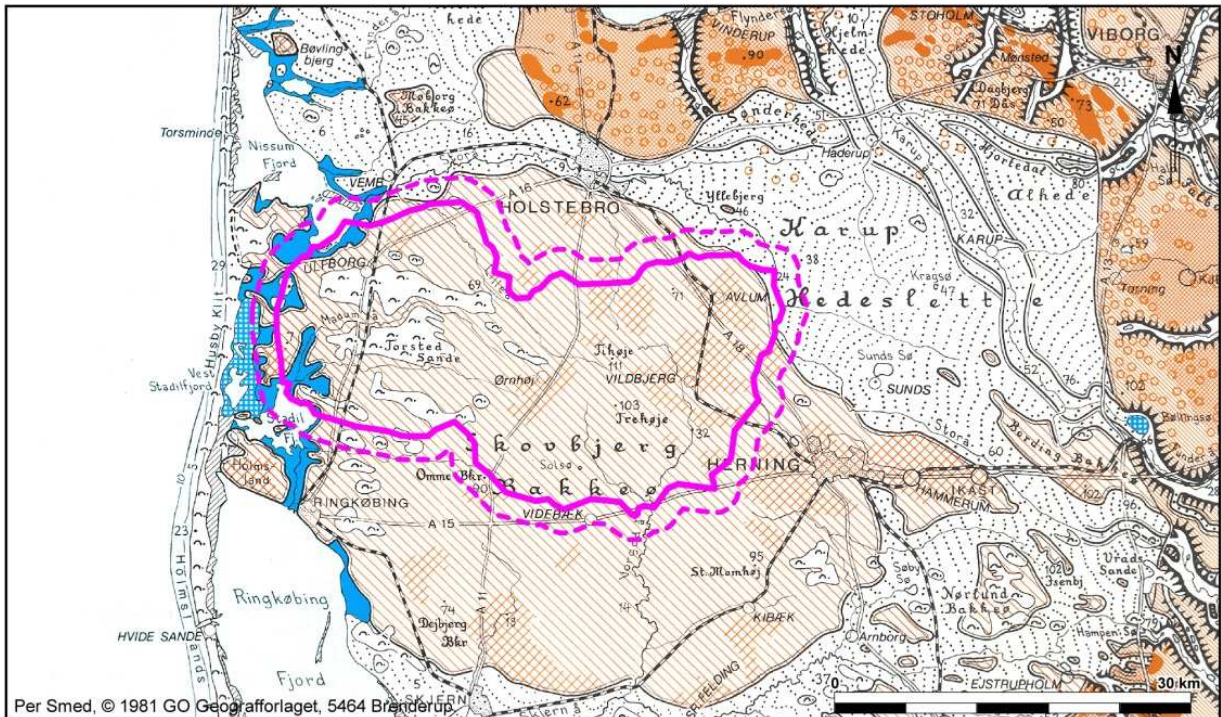
Nærværende bilag indeholder en kort beskrivelse af modelgrundlaget for vurdering af markvandings indflydelse på afstrømning under forskellige forudsætninger herunder hydrogeologiske forhold.

Den anvendte model er baseret på modelkoden MIKE SHE, som er en integreret grundvands- og overfladevandsmodel, der er i stand til at vurdere, hvilken betydning grundvandsforhold har på afstrømning i vandløb. Modelkoden har mulighed for at anvende forskellige kompleksitetsniveauer i beregningerne, og det er de mest avancerede metoder, der er taget i anvendelse i de gennemførte beregninger.

Som et repræsentativt opland er Tim Å oplandet udvalgt. Oplandet ligger i det hydrologiske opland til Ringkøbing Fjord, og der foregår markvanding i dette opland. Oplandet ligger på Skovbjerg Bakkeø og indeholder byen Torsted mellem Holstebro og Herning.

Nedenstående Figur 1 og Figur 2 viser dels de overordnede geologiske forhold i området og den geografiske placering af Tim Å.

Modeldata stammer fra forskellige kilder; der er taget udgangspunkt i en af GEUS opstillet model for det hydrologiske opland til Ringkøbing Fjord - HOBE-modellen - som igen er baseret på DK-modellen, Højbjerg et al. 2010. Desuden er der inddraget data fra en senere udviklet geologisk model og grundvandsmodel for Staby-Vildbjerg kortlægningsområde, Naturstyrelsen 2011 og 2012.



Figur 1 Overordnet geologisk tolkning i det område, hvor de undersøgte vandløbs-oplande ligger



Figur 2 *Tim Å forløber fra øst mod vest og løber gennem Stadil Fjord ud i Ringkøbing Fjord*

I forbindelse med forskningsprojektet HOBE har GEUS opstillet en integreret grundvands- og overfladevandsmodel for oplandet til Ringkøbing Fjord. Modellen kan simulere vandstrømninger i den umættede zone, grundvandet og vandløb. Modellen er baseret på den Nationale Vandressource Model, DKmodel 2009, der er udviklet i forbindelse med NOVANA overvågningsprogrammet. Denne hydrologiske model er anvendt som udgangspunkt for udvikling af oplandsmodellen for Tim Å. Desuden er den geologiske model og grundvandsmodellen for kortlægningsområdet Staby-Vildbjerg anvendt - begge disse modeller er opstillet af COWI i forbindelse med Naturstyrelsens grundvandskortlægning i dette område.

1.2 Opdatering af oplandsmodellen

Den hydrologiske model for Ringkøbing Fjords opland har været anvendt i et tidligere projekt hos COWI, nemlig i forbindelse med at vurdere oversvømmelsesrisici for Ringkøbing-Skjern kommune, Ringkøbing Skjern kommune (2010). I den forbindelse blev modellens datagrundlag justeret og opdateret bl.a. med nye klimadata. GEUS's modelopsætning er ligeledes justeret i forhold til drænbeskrivelsen, beregningsmetode i vandløb og grundvandsmodellen.

Klimadata

I den justerede model anvendes 40 km x 40 km griddata i stedet for GEUS' opsætning med stationsnedbør fra 45 stationer. Dette er en lidt simplere tilgang til anvendelse af klimadata, men i forhold til de beregninger, som gennemføres i nærværende projekt har det ingen indflydelse.

I den opdaterede model benyttes nedbørsdata fra 6 grid: Nr. 40003, 40004, 40009, 40010, 40017 og 40018. Nedbøren korrigeres med månedlige standardkorrektioner for lækategori B. Desuden benyttes referencefordampning (Makkink) og temperatur fra 2 grid: Nr. 40004 og 40018.

Der anvendes klimadata for perioden 1998-2002 i de gennemførte beregninger. Ved scenarieberegninger er det nødvendigt at have en indledende "opvarmingsperiode" i modellen, hvor den ændrede situation når at indstille sig. Derfor er benyttet en simuleringsperiode fra 1990-2002. I perioden 1990-1992 er benyttet data fra perioden 2000-2002. Fra 1993-1997 er benyttet klimadata fra årene 98-02 og i perioden.

Dræn

Der blev fundet en række deloplande, hvor drænvand ikke blev transporteret til vandløb, men i stedet blev afledt til en fiktiv sø i det laveste område i modellen. Dette er rettet op.

Vandløbsmodel

I GEUS originale model blev vandføring i vandløb simuleret simpelt ved kun at transportere vandet nedstrøms (såkaldt routing). På baggrund af vandføringen udregnes vandstanden i vandløbet alene på baggrund af Mannings modstandsformel, hvor den hydrauliske modstand i vandløbet og vandløbstværsnit indgår. Denne simple metode har den ulempe, at vandstanden i Ringkøbing Fjord ikke afspejles i den beregnede vandføring og vandstand i vandløbene. Det betyder, at simulerede vandstande bliver for lave, specielt i den nedre del af vandløbene.

Nøjagtigheden af de gennemsnitlige vandføringer (F_{bal}) og den simulerede vandføringsdynamik (Nash-Sutcliffe, R^2) blev simuleret godt ved de fleste målestationer med den oprindelige GEUS model. For GEUS' modellen var den gennemsnitlige fejl på vandføringerne (F_{bal}) 5% for alle vandløb, svarende til at modellen underestimerer med 5%. Dynamikken af den simulerede vandføring var også ret god med GEUS' model med et gennemsnit for R^2 på 0,51, hvor værdien 1 er det optimale.

Nøjagtigheden af modellens vandføringsdynamik blev lidt dårligere, da det originale klimainput blev udskiftet med færre og grovere data. Med henblik på at forbedre dynamikken af den simulerede vandføring, blev drænkonstanten i grundvandsmodellen forsøgt ændret. I den kalibrerede model blev drænkonstanten ændret fra $7,5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ til $4 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ og vandføringsdynamik (R^2) blev forbedret for de fleste vandløb, og gennemsnittet for dem alle er bedre end GEUS' originale model. Desuden er modellens gennemsnitlige vandbalance (F_{bal}) -1%, svarende til at modellen overestimerer vandføringen med 1%, hvilket er et fuldt ud acceptabelt resultat.

Nøjagtigheden af den beregnede vandstand i vandløbet er desuden afhængig af, om koterne for vandløbstværsnittet er godt eller dårligt bestemt. Vandløbsmodellen er forholdsvis grov og egnet til overslagsberegninger af vandstand i oplandet. Til vurdering af ændringer er dette dog fuldt ud tilstrækkeligt.

Den originale model for oplandet var ikke kalibreret i forhold til vandstande i vandløb. Der er i den opdaterede model foretaget en grov kalibrering ved at ændre på Manningtallet. Ved nogle af vandstandsstationerne var det ikke nok at ændre på Manningtallet for at simulere vandstandskoten korrekt. På disse steder blev koten af vandløbstværsnit justeret. I øvrigt blev koten kontrolleret i forhold til højdemodellen ved alle vandløbstværsnit, hvor der findes vandstandsmålinger i nærheden.

Grundvandsmodel

Den største ændring i modellen er, at den hydrostratigrafiske model, som bestemmer laggrænser for beregningslagene, er udskiftet med en nyere, der er baseret på et væsentlig mere omfattende og opdateret datagrundlag. Denne model baserer sig på Naturstyrelsens kortlægning i området, som er udført af COWI. Den opdaterede hydrostratigrafiske model har allerede været anvendt i en grundvandsmodel for området, og der er foretaget omfattende kalibrering og validering af denne model.

Derfor må dette datagrundlag forventes at være en væsentlig forbedring af det oprindelige og i langt højere grad afspejle de faktiske forhold i oplandene.

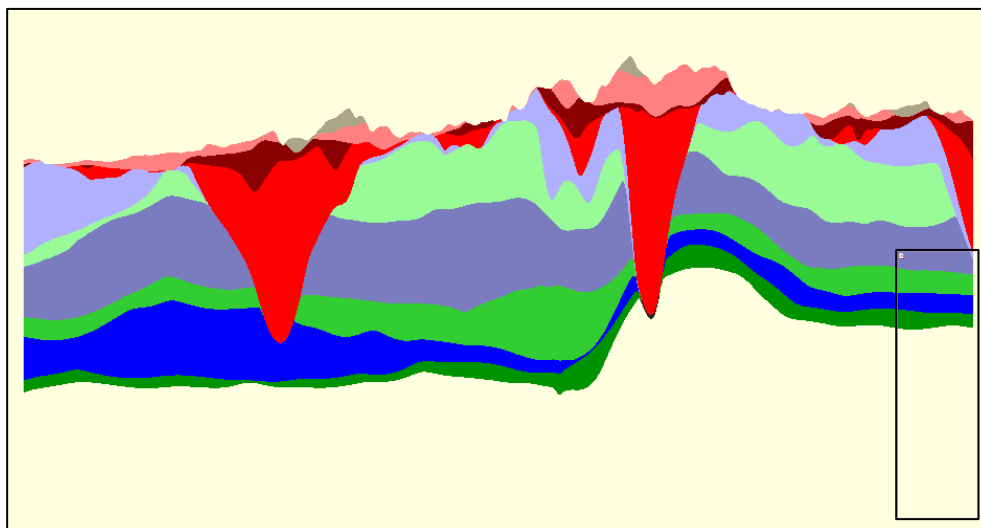
Modellen er desuden diskretiseret i et 100 m beregningsnet, hvor den oprindelige model var diskretiseret i et 200 m beregningsnet i det horisontale plan. Der er 10 beregningslag til at beskrive den hydrostratigrafiske lagserie.

Den hydrostratigrafiske lagfølge i området er vist i Tabel 1. Sand 1 til Sand 5 udgør grundvandsmagasiner, mens Ler 1 til Ler 5 er mere lavpermeable og udgør akvifærder. Enkelte steder er de begravede dale med Sand 2 og Ler 3 eroderet helt ned gennem Sand 5.

Tabel 1 Beregningslagene i den opdaterede grundvandsmodel

Beregningslag 1: Ler 1 – Øvre ler
Beregningslag 2: Sand 1 – Øvre sand
Beregningslag 3: Ler 2 – Mellem ler
Beregningslag 4: Sand 2 – Mellem sand
Beregningslag 5: Ler 3 – Nedre ler
Beregningslag 6: Sand 3 – Øvre Odderup
Beregningslag 7: Ler 4 - Arnum
Beregningslag 8: Sand 4 - Øvre Bastrup
Beregningslag 9: Ler 5 - Øvre Klintinghoved
Beregningslag 10: Sand 5 - Nedre Bastrup

Et typisk øst-vestgående tværsnit i modellen er vist i nedenstående figur.



Figur 3 Grundvandssystemet er domineret af sandede og lerede aflejringer af forskellig tykkelse og meget markante begravede dalsystemer, som skærer sig ned gennem lagene

Ler 1: Det øvre hydrostratigrafiske lag består af moræneler og mindre dele smeltevandsler. Laget tolkes at have en dårlig hydraulisk ledningsevne, men kan være kraftigt opsprækket som følge af periglacial påvirkning. Laget er typisk 2-5 meter tykt.

Sand 1: Denne enhed består af smeltevandssand, med stor horisontal udbredelse. Laget er typisk 10-15 meter tykt.

Ler 2: Enheden består af smeltevandsler med mindre dele moræneler. Enheden indeholder dog typisk flere større og mindre linser/lag af smeltevandssand. Laget er typisk 2-5 meter tykt. Laget tolkes overordnet at have en dårlig hydraulisk ledningsevne, men sand-linser kan lokalt give en større hydraulisk ledningsevne.

Sand 2: Denne enhed består af smeltevandssand med enkelte mindre linser af smeltevandsgrus. Enheden danner typisk dalfyld i de begravede dale og opnår her lagmægtigheder på 80 til 90 meter. Andre steder kan laget helt mangle. Enheden tolkes at have en god hydraulisk ledningsevne.

Ler 3: Enheden består af smeltevandler samt glimmerler fra Måde gruppe. Laget har en kontinuerlig udbredelse mod vest og består her af glimmerler fra Måde Gruppen, med mindre dele kvartært smeltevandsler. Lagtykkelsen kan her lokalt være op til 50 meter. Laget tolkes at have en dårlig hydraulisk ledningsevne.

Sand 3: Odderup Formationen består af i alt fire sandede enheder. I denne model er alle sandslag slået sammen til et lag. Enheden tolkes at have en god hydraulisk ledningsevne.

Ler 4: Dette lag er udbredt over hele modelområdet og består hovedsagelig af glimmerler fra Arnum Formationen samt mindre dele kvarts- og glimmersand fra de deltaiske og fluviale dele af Odderup Formationen. Enheden har en tykkelse på 70-80 meter, men mindre lagtykkelser ses ved begravede dale som følge af kvartær erosion. Enheden tolkes som helhed at have en dårlig hydraulisk ledningsevne.

Sand 4: Den øvre Bastrup enhed er udbredt over hele modelområdet og består hovedsagelig af kvartssand med enkelte mindre lag af glimmersand og glimmerler.

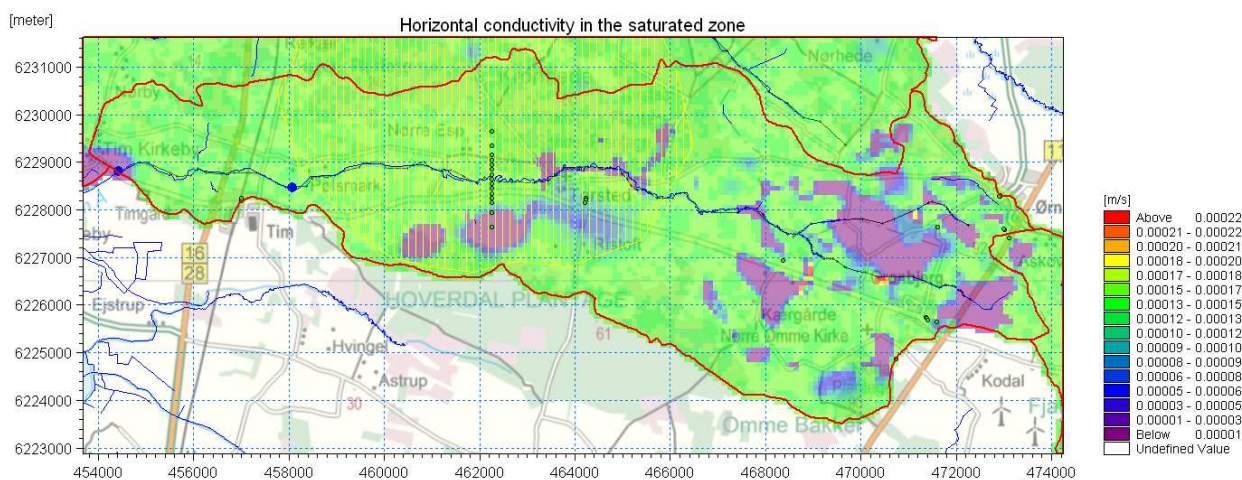
Laget har en mægtighed på mellem 10 til 20 meter. Enheden tolkes at have en god og ensartet hydraulisk ledningsevne.

Ler 5: Laget er udbredt over hele kortlægningsområdet og er tolket i såvel boringer som i seismik. Laget udviser vekslende mægtigheder fra mellem 2-10 meter. Enkelte steder nær formodede forkastninger. Laget består af glimmerler og tolkes at have en dårlig hydraulisk ledningsevne.

Sand 5: Mægtighed af Nedre Bastrup er forholdsvis ensartet, dog kan laget helt mangle ved forkastninger. Laget har typisk en mægtighed på 8 til 10 meter og består af kvartssand. Laget tolkes dermed at have en god hydraulisk ledningsevne.

Magasinforholdene i de fem grundvandsmagasiner er undersøgt ved at sammenstille målt grundvandspejlinger og toppen af magasinet for hvert magasin. Alle magasiner dybere end Sand 2 er spændte magasiner. Pejledata fra Sand 2 viser, at dette magasin er spændt i store dele af området. I magasin Sand 1 er der frit magasin i stort set hele modelområdet, og kun i mindre områder omkring vandløb og vådområder er der spændt magasin. Det må forventes at både Sand 1, Sand 2 og Sand 3 udnyttes til markvandingsboringer, mens Sand 4 og Sand 5 ikke udnyttes til dette formål.

Det er ligeledes undersøgt, hvordan sammenhængen mellem vandløb og grundvand varierer langs vandløbet. Dette er sket ved at bestemme den resulterende hydrauliske ledningsevne af de øverste to modellag som vist i Figur 4. Figuren viser, at der er nogen variation i kontakten mellem grundvand og overfladevand i visse dele opstrøms de indlagte indvindingsboringer, mens der nedstrøms ikke er forskel i kontakten. Det må derfor formodes, at der er relativ god kontakt nedstrøms de indlagte indvindingsboringer, og at denne kontakt styres udelukkende af angivelsen af vandløbets lækagekoefficient.



Figur 4 Variationen i sammenhængen mellem grundvand og vandløb langs Tim Å udtrykt ved den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne i de to øverste modellag i grundvandsmodellen

1.3 Kalibrering af oplandsmodellerne

GEUS' eksisterende model er kalibreret mod omkring 2000 pejlinger i oplandet. Modellen overestimerede generelt trykniveauerne med gennemsnitligt 2,1 m. I den opdaterede model er der ikke udført en ny kalibrering af modellens trykniveauer, men i stedet foretaget en sammenligning med GEUS's model i udvalgte punkter og modellag. Denne sammenligning peger på, at den opdaterede model simulerer trykniveauer i samme niveau som GEUS's model.

Da modellen skal anvendes til at bestemme forskelle mellem 2 forskellige situationer anses denne kalibrering for fuldt ud tilstrækkelig.

2 Modelscenarier

Der er udvalgt en markvandingslokalitet vest for den lille by Torsted, ca. midt på vandløbsstrækningen, idet der er ca. 8000 m til modelrand nedstrøms og 7000 m opstrøms. Oplandet er knap 4 km "bredt" i nord-syd gående retning på dette sted - se **Error! Reference source not found.**

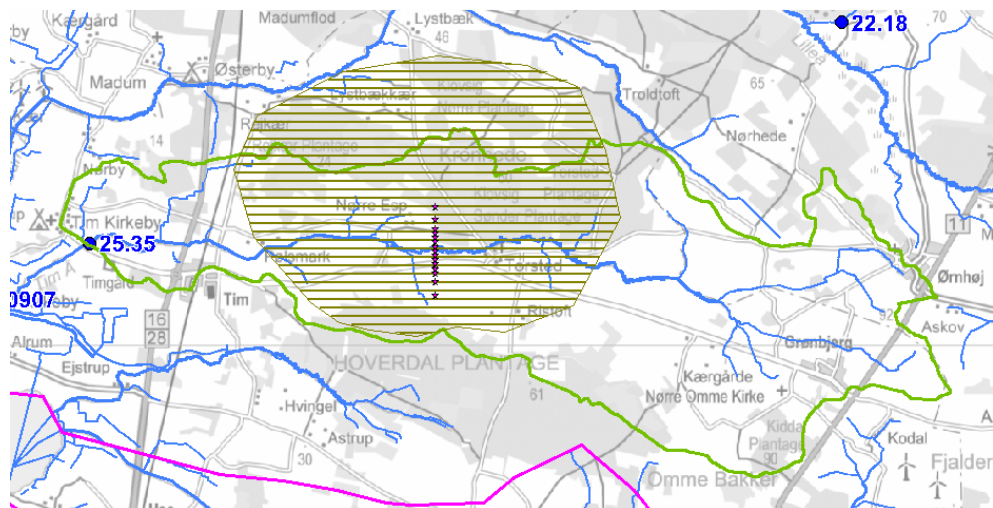
Der er et lille spildevandstilløb umiddelbart opstrøms formentlig fra et renseanlæg ved Torsted. Tilløbet ophører dog i år 2000, så det er valgt at sætte tilløbet til nul i hele modelperioden, så det ikke forstyrrer resultaterne. Der er lagt potentielle markvandingsboringer i en afstand af 100, 200, 300, 500, 700 og 900 m nord og syd for vandløbet.

Geologisk er der stor forskel nord og syd for vandløbet. Den nordlige del er kendetegnet ved et 10-15 m tykt Sand1 lag (fra terræn). Herunder findes et tyndt lerlag (Ler2), og herunder igen et udbredt sandlag (Sand2, ca. 15 m tykt). Syd for vandløbet er det øvre sandlag (Sand1) ikke til stede, men er erstattet af ler (Ler2).

Der er opstillet en række scenarier for at belyse effekten af hydrogeologiske forhold, markvandingsboringens afstand fra vandløbet, sammenhængen mellem grundvand og vandløb og tidsforskydningen af påvirkningen i forhold til hvornår oppumpningen til markvandingen foregår.

Der er gennemført basisscenarier uden markvanding i hele oplandet både uden lerlinse og med lerlinse med forskellige hydrauliske egenskaber. Derefter indlægges en markvandingsboring med en kapacitet på 50 m³/time. Indvindingsboringens afstand til vandløb varierer, der varierer på lækagekoefficient i vandløb, der varierer på om en lerlinse er til stede eller ej og med forskellig hydraulisk ledningsevne, K_h , og endelig varierer der på vandingsperioden.

Der udtrækkes resultater fra modelberegningerne i et antal punkter i vandløbet nedstrøms markvandingsboringen, og tidsserierne undersøges statistisk. Figur 5 viser, hvor lerlinsen forventes at være til stede i oplandet. Indvindingen foretages fra Sand 1 eller Sand2, svarende til ned til en dybde af ca. 30 m.



Figur 5 Oplandet til Tim Å station 25.35 er markeret med rødt. De foreslåede placeringer af markvandingsboringer er vist med x-er.

