# Vurdering af vandresursen for fire store vandkraftpotentialer i Sydvestgrønland

Industripotentialerne 06.g, 07.d, 07.e og 07.f og deres udvikling i perioden 1980-2014

Andreas P. Ahlstrøm, Dorthe Petersen, Kenneth D. Mankoff, Robert S. Fausto, Signe B. Andersen, Nanna B. Karlsson, Karina Hansen, Peter L. Langen & Ruth H. Mottram

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND, ENERGI-, FORSYNINGS- OG KLIMAMINISTERIET



# Vurdering af vandresursen for fire store vandkraftpotentialer i Sydvestgrønland

Industripotentialerne 06.g, 07.d, 07.e og 07.f og deres udvikling i perioden 1980-2014

Andreas P. Ahlstrøm, Dorthe Petersen, Kenneth D. Mankoff, Robert S. Fausto, Signe B. Andersen, Nanna B. Karlsson, Karina Hansen, Peter L. Langen & Ruth H. Mottram

MISISSUEQQAARNERIT/GRØNLANDS FORUNDERSØGELSER, ANINGAASAQARNERMUT NUNANILU AVANNARLERNI SULEQATIGIINNERMUT NAALAKKERSUISOQARFIK / DEPARTEMENTET FOR FINANSER OG NORDISKE ANLIGGENDER NAALAKKERSUISUT







# Indholdsfortegnelse

Introduktion	4
Baggrund	5
Vandresurses udvikling i det sydvestlige Grønland	7
Fire vandkraftpotentialer med forudgående undersøgelser	13
Metode Måling af vandresursen Måling af vandstanden Q/h-relationen Manuelle vandføringsmålinger Vandresursen Udfyldning af dataudfald i målt tidsserie Statistisk vurdering	15 15 16 16 16 17 17 18 19
Fejlanalyse af oplandsafgrænsning	20
Modelbaseret vandføring	22
Vandkraftpotentiale 06.g Monitering af vandresursen Etablering af tidsserien for 1980-2014 Vandresursen	<b>24</b> 24 26 27
Vandkraftpotentialet 07.d Monitering af vandresursen Etablering af tidsserien for 1980-2014 Vandresursen	<b>30</b> 30 31 32
Vandkraftpotentialet 07.e	35
Monitering af vandresursen Etablering af tidsserien for 1980-2014 Vandresursen	35 36 37
Vandkraftpotentialet 07.f	39
Monitering af vandresursen Etablering af tidsserien for 1980-2014 Vandresursen	39 40 41
Konklusion	44
Litteraturliste	47

### Introduktion

Denne rapport er udført i fællesskab af GEUS og Asiaq på bestilling af Departementet for Erhverv, Arbejdsmarked, Handel og Energi, Grønlands Selvstyre, i samråd med Nukissiorfiit.

Målsætningen er at levere en opdateret vurdering af vandresursen for fire store vandkraftpotentialer i Sydvestgrønland: Industripotentialerne 06.g, 07.d, 07.e og 07.f. Vurderingen dækker udviklingen over perioden 1980-2014 og bygger på data indsamlet af Asiaq Grønlands Forundersøgelser (og før dette Grønlands Tekniske Organisation), understøttet af modelresultater fra den regionale klimamodel HIRHAM5 kørt af Danmarks Meteorologiske Institut og glaciologiske/glacialhydrologiske data og metoder anvendt af De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland.

### Baggrund

Vandkraft er et centralt element i omlægningen af Grønlands energiforsyning til vedvarende energi. Fortsat udbygning af vandkraftkapaciteten i Grønland vil være af afgørende betydning for at den økonomiske vækst i det grønlandske samfund kan kombineres med bæredygtig udvikling. Globalt set er vandkraft i vækst med yderligere 31,5 GW installeret i 2016, hvoraf vandkraft som pumpet reservoir for den mere varierende solog vindenergi udgjorde 6,4 GW (IHA, 2017).

Potentialet for vandkraft i Grønland er tæt forbundet med mængden af smeltevand fra Indlandsisen og med mængden af nedbør. Derfor har de igangværende ændringer i det globale klima direkte økonomiske konsekvenser og dermed indflydelse på udformningen af en strategi for den fremtidige energiforsyning. De globale klimaændringer foregår i et accelereret tempo i Arktis, hvor temperaturen stiger næsten dobbelt så hurtigt som den globale middeltemperatur og de atmosfæriske cirkulationsmønstre viser tegn på at være under forandring (AMAP, 2017). Der er globalt fokus på indlandsisens øgede bidrag til den stigende vandstand i verdenshavet, men klimaforandringerne har også lokal betydning for det grønlandske samfund.

Klimaforandringerne betyder at den eksisterende oversigt over Grønlands vandkraftpotentiale leveret i Nukissiorfiits rapport "Grønlands vandkraftressourcer. En oversigt – August 2005" (Nukissiorfiit, 2005) sandsynligvis underestimerer vandkraftpotentialernes aktuelle størrelse, specielt for oplande med delvist isdække. De betyder også at variabiliteten i afstrømningen fra år til år har fået større betydning – denne parameter er ikke inddraget i rapporten fra 2005. Manglen på kendskab for det aktuelle potentiale af oplande uden isdække er også af betydning, da nedbørsmønstrene er under ændring i takt med klimaforandringerne.

Naalakkersuisut finansierer indsamling af grundlæggende data fra en række af de største vandkraftpotentialer, hvorfra egentlig afstrømning kan beregnes. Data fra perioden efter 2005 er af naturlige årsager ikke inddraget i Nukissiorfiits rapport fra 2005. Det vil derfor være en fordel at udføre en opdateret analyse af Grønlands vandkraftpotentiale med inddragelse af de allerede indsamlede observationer af afstrømningen og de omfattende datasæt, de seneste års intensive forskning i indlandsisens bidrag til havspejlsstigning har gjort tilgængelige.

Denne rapport repræsenterer andet skridt i en opdatering af den eksisterende samlede oversigt fra Nukissiorfiit over Grønlands vandkraftresurser fra 2005, hvor første skridt var en indledende analyse præsenteret i GEUS-Notat 10-NA-17-01 (Ahlstrøm m.fl., 2017). Indledningsvis gengives resultatet fra denne analyse for det sydvestlige Grønland, hvorefter der fokuseres på en ny vurdering af de bedst undersøgte industripotentialer 07.d, 07.e, 07.f og 06.g (beliggende syd for Kangerlussuaq og nordøst for Nuuk og Maniitsoq), hvor betegnelserne stammer fra Nukissiorfiit (2005). Disse oplande er domineret af afsmeltning fra indlandsisen og afgrænsningen vil i første omgang udelukkende være baseret på isens overflade. Der vil således ikke indgå undersøgelse af risiko for oplandsændringer/variabilitet. Der vil indgå et estimat af afstrømningen/potentialets udvikling over perioden 1980-2014, baseret på kombination af målte data og modelberegninger.

De fire oplande er kendetegnet ved at have afløbsdata fra varierende dele af denne periode og anses for at være attraktive i forbindelse med markedsføring overfor energiintensive virksomheder, som fx større internationale datacentre.

### Vandresurses udvikling i det sydvestlige Grønland

Det første skridt i tilvejebringelsen af et tilstrækkeligt beslutningsgrundlag for en mulig udbygning af vandkraften i Grønland indebærer en vurdering af betydningen af den allerede indtrufne ændring i klimaet. Et første overordnet bud på denne ændring blev givet i GEUS-Notat 10-NA-17-01 (Ahlstrøm m.fl., 2017) og resultaterne gengives her. Til det overordnede bud anvendes en særlig type regional klimamodel, der sættes til at udnytte de indsamlede meteorologiske data og som indeholder både et estimat af afstrømningen fra indlandsisen og af den nedbørsdrevne afstrømning fra det isfri land. Denne opdeling gør det også muligt at få et oversigtsbillede af ændringerne for henholdsvis de store industrielle potentialer, der afhænger af afstrømningen fra indlandsisen og de mindre bynære potentialer, der ofte primært afhænger af nedbøren i det isfri land. Vi har benyttet en kørsel af Danmarks Meteorologiske Instituts (DMI) regionale klimamodel HIRHAM5 der lever op til ovenstående krav og har trukket data ud for det mest relevante område for vandkraft i Grønland (modeldomænet er afgrænset med rødt i Figur 1).



**Figur 1.** Kort over det sydvestlige Grønland med markering af det anvendte modeldomæne for en kørsel med den regionale klimamodel HIRHAM5.

Langt størstedelen af Grønlands realisérbare vandkraftpotentiale er beliggende mellem Ilulissat og Nanortalik. Derfor er denne region udvalgt til nærmere analyse af udviklingen i afstrømning fra hhv. indlandsisen og det isfrie land, estimeret ved kørsel med DMI's regionale klimamodel HIRHAM5. Denne model er kørt ved hjælp af såkaldte re-analyserede data fra ERA-Interim over perioden 1980-2014, hvilket betyder at modellen, i den grad det er muligt, er baseret på observerede data. Modellen arbejder med horisontal opløsning på 5,5 km og giver et resultat hver 90. sekund og er yderligere beskrevet i Ahlstrøm & Petersen m.fl. (2017). Her har vi valgt at fokusere på at vise forskellen i afstrømningen for henholdsvis det isdækkede og det isfri land mellem de første tolv år og de sidste tolv år i modelkørslen, henholdsvis 1980-1991 og 2003-2014. Den sidste periode er valgt fordi der siden 2003 synes at være indtrådt et markant skift i klimaet (Ahlstrøm & Petersen m.fl., 2017), den første periode er valgt for at ligge så tidligt så muligt i modelkørselsperioden. Forskellen mellem perioderne har vi efterfølgende valgt at illustrere både gennem et farvekodet kort over det sydvestlige Grønland og gennem forskellen i den månedlige middelafstrømning for hele det afgrænsede modeldomæne vist med rødt i Figur 1.

Resultatet for modelkørslen for afstrømningen fra isdækkede områder er vist på Figur 2. Her viser Figur 2a, hvordan forskellen i afstrømning mellem de to perioder fordeler sig geografisk over et område op til over 100 km bredt fra randen af indlandsisen og indefter, med en årlig middelforskel, der i store områder kommer op på over 800 millimeter vandækvivalent. Figur 2b viser det samme resultat, men hvor forskellen er angivet i procent yderligere afstrømning, således at det røde område viser den markante udvidelse af det areal af indlandsisen, der oplever øget relativ afstrømning. Højere oppe på isen genfryser smeltevandet i den kolde underliggende sne, hvilket forhindrer smeltevandet i at nå ud til det isfri land.



**Figur 2.** Resultater fra den regionale klimamodel over det isdækkede område i det sydvestlige Grønland. Panel a) Forskellen i afstrømningen mellem 1980-1991 og 2003-2014 angivet i millimeter vandækvivalent (den mængde vand, den smeltede is ville svare til). Panel b) Den samme forskel angivet i procent.

Hvis man opsummerer den regionale klimamodels resultater på månedsbasis indenfor den isdækkede del af området markeret med rødt i Figur 1, kan den samlede forskel kvantificeres og fordelingen henover året vurderes. Det ses i Figur 3 at den relative forskel er størst i starten og slutningen af afstrømningssæsonen fordi denne udvides, men er volumenmæssigt vigtigst i juni-august. Den samlede stigning i afstrømningen fra isen i det sydvestlige Grønland er beregnet til over en halv gang mere (54 %) mellem de to 12-års perioder 1980-1991 og 2003-2014.



**Figur 3.** Den regionale klimamodels beregnede månedlige middelafstrømning for den isdækkede del af det afgrænsede modeldomæne (vist med rødt i Figur 1). Den blå farve angiver perioden 1980-1991 og den røde farve viser den yderligere tilvækst i perioden 2003-2014.

For de mindre, ofte bynære, oplande er resultatet af modelkørslen for afstrømningen fra de isfri områder mere relevant og vises på Figur 4. Her viser Figur 4a en relativ lille ændring i størrelsen af afstrømningen fra det isfri land, typisk varierende mellem +1 og -1 millimeter vandækvivalent. Den procentmæssige forskel i Figur 4b viser den samme geografiske fordeling som i Figur 4a. Umiddelbart kan det ses at forskellen i afstrømningen mellem de to perioder er væsentlig mindre end for de isdækkede områder og fordeler sig geografisk ujævnt. Nord for Nuup Kangerlua/ Godthåbsfjorden er områderne nær indlandsisens rand blevet mere tørre, mens områderne nærmere kysten er blevet vådere. Syd for Nuup Kangerlua/ Godthåbsfjorden er det primært blevet mere tørt med enkelte undtagelser.



**Figur 4.** Resultater fra den regionale klimamodel over det isfri område i det sydvestlige Grønland. Panel a) Forskellen i afstrømningen mellem 1980-1991 og 2003-2014 angivet i millimeter vandækvivalent (den mængde vand, den smeltede is ville svare til). Panel b) Den samme forskel angivet i procent.

Hvis man som før opsummerer den regionale klimamodels resultater på månedsbasis indenfor den isfri del af området markeret med rødt i Figur 1, ses det at værdierne er mere end en størrelsesorden mindre end for den isdækkede del (se Figur 5). Samtidig ved vi fra Figur 4, at det er en sum af både positive og negative tal og derfor dækker over en potentielt set større forskel, der lokalt kan have både positivt og negativt fortegn. Den samlede sum viser dog en beregnet gennemsnitlig stigning i afstrømningen fra det isfri land på en tredjedel (33 %) mellem de to 12-års perioder 1980-1991 og 2003-2014.



**Figur 5.** Den regionale klimamodels beregnede månedlige middelafstrømning for den isfri del af det afgrænsede modeldomæne (vist med rødt i Figur 1). Den blå farve angiver perioden 1980-1991 og den røde farve viser den yderligere tilvækst i perioden 2003-2014. Tallene er mere end en størrelsesorden mindre end for den isdækkede del af modeldomænet vist i Figur 3 og det er væsentligt at bemærke at det er summen af ændringer over hele modeldomænets isfri del, hvilket skjuler at tallet lokalt set kan være større og af både positiv og negativ værdi (se Figur 4)

## Fire vandkraftpotentialer med forudgående undersøgelser

For at udnytte det eksisterende datamateriale bedst og effektivt påbegynde en opdatering af Grønlands vandkraftpotentiale fokuseres der som nævnt i første omgang på en ny vurdering af de bedst undersøgte industripotentialer 07.d, 07.e, 07.f og 06.g (se Figur 6).

Tre af disse fire industripotentialer er baseret på en forudsætning om at der etableres forbindelse mellem flere naturlige oplande. I undersøgelsen indgår datamateriale indsamlet i disse oplande og de er derfor i udgangspunktet analyseret separat og efterfølgende lagt sammen i en afsluttende analyse af potentialernes udvikling.

Først gennemgås den af Asiaq anvendte metode til måling af afstrømningen og GEUS' metode til afgrænsning af oplandet på indlandsisen og i det isfri land. Dernæst gennemgås for hvert enkelt opland graden af datadækningen, etableringen af en ensartet tidsserie 1980-2014 og endeligt den estimerede vandresurse. Tidsrummet 1980-2014 er valgt for at have et velfunderet sammenligningsgrundlag mellem potentialerne. Målte afløbsdata er brugt som udgangspunkt, suppleret med bias-justerede data fra nærliggende oplande eller fra den regionale klimamodel HIRHAM5 for at udfylde hullerne i de observerede tidsserier.



Figur 6. Fire kendte vandkraftpotentialer med kapacitet til industriel udnyttelse.

### Metode

#### Måling af vandresursen

Vandresursen i et opland betragtes som den gennemsnitlige årlige afstrømning for oplandet og beregnes således fra afstrømningstidsserien. Afstrømningen måles ikke direkte, men beregnes indirekte ud fra løbende målinger af vandstanden og en etableret relation mellem vandstand og vandføring, kaldet Q/h-relationen, der er specifik for et givent afløb. Ved vandstanden forstås koten af vandoverfladen, og denne vil variere afhængig af tilstrømningen af vand. I grønlandske søer vil vandstanden typisk være høj om sommeren og lav om vinteren. Forskellen i vandstand mellem sommer og vinter vil typisk være 1-3 meter, men for nogle søer kan forskellen være helt op til 10 meter.

#### Måling af vandstanden

Vanddybden moniteres af en automatisk målestation ved hjælp af tryktransducere placeret på bunden af søen eller floden. Tryktransducere kan konvertere tryk til et analogt elektrisk signal. Den hydrometriske station ved opland 07.d.I er illustreret i Figur 7 som eksempel. Vanddybden måles dagligt eller flere gange dagligt. Koten af vandoverfladen (vandstanden) måles relativt til et referencepunkt (datum) ved nivellering hver gang stationen besøges. Tryktransducerens position (højde) findes ved at sammenholde resultatet fra nivelleringen med vanddybden målt samtidigt af tryktransduceren. En tidsserie for vandstanden kan på denne måde udledes af sensorpositionen og den målte tidsserie af vanddybde.



**Figur 7.** Hydrometrisk station til overvågning af opland 07.d.l. Stationen måler vanddybden og udvalgte klimatiske parametre (lufttemperatur, vindhastighed og nedbør). Stationens energiforbrug leveres af solpaneler og batterier. Data lagres i en datalogger på stationen og transmitteres dagligt til Asiaqs kontor via et iridium satellitmodem. Foto: Asiaq.

#### Q/h-relationen

En Q/h-relation er en empirisk bestemt relation der angiver vandføringen som en funktion af den målte vandstand. Det anbefales generelt at basere en Q/h-relation på mindst 12 til 15 manuelle målinger af vandføringen fordelt jævnt over det spænd af vandstande der kan forekomme på lokaliteten (ISO 1100-2). Da en Q/h-relation er en empirisk bestemt funktion, vil ekstrapolation udover spændet af manuelt målte vandføringer indebære en højere grad af usikkerhed der kun bør anvendes efter grundig evaluering. Særligt ekstrapolation udover den maksimalt manuelt målte vandføring (opadgående ekstrapolation) kan være problematisk, hvorimod ekstrapolation til lavere værdier (nedadgående ekstrapolation) er mindre problematisk da relationen begrænses nedefter af grænseværdien nul afstrømning.

#### Manuelle vandføringsmålinger

Vandføring måles manuelt ved hastigheds-arealmetoden (ISO 748). Vandets strømhastighed måles i en række punkter distribueret henover et tværsnit af floden (se Figur 8). Generelt foretages målingerne afhængigt af vanddybden i 1-4 dybdeniveauer i omkring 15-20 vertikaler (lodrette målepunkter) fordelt henover floden. Vandføringen udregnes derefter ved integration af hastighederne målt over tværsnittet.



**Figur 8.** Måling af vandføring ved udløbet fra opland 07.d.l. En wire placeres henover floden ved måletværsnittet og strømhastigheden måles med en akustisk Doppler strømningsmåler (ADCP) monteret på en lille gul katamaran-båd der kan ses på billedet nær ved den modsatte bred. Foto: Asiaq.

#### Vandresursen

En tidsserie for vandføringen beregnes ud fra tidsserien af vandstand og Q/h-relationen. Mindre dataudfald i tidsserien udfyldes ved lineær interpolation. Dataudfald uden for smeltesæsonen udfyldes med en gennemsnitlig basis-vandføringskurve for oplandet. Uden for smeltesæsonen er vandføringen som regel meget lav og falder gennem vinteren i takt med at vandreservoirer (som fx søer) indenfor oplandet tømmes. Vandføringskurven har således nogenlunde den samme form hvert år om end der kan være en tidslig forskydning afhængigt af intensiteten af det givne års smeltesæson.

Vandføringstidsserien integreres for at give en årlig vandføring. Da den årlige vandføring kan variere en hel del fra år til år afhængigt af klimaet anbefales det at basere en evaluering af vandresursen for et potentielt vandkraftværk på en vandføringstidsserie på 25 år (Nukissiorfiit, 2005). I denne rapport etablerer vi tidsserier af vandføringen for den 35-årige periode 1980-2014.

### Udfyldning af dataudfald i målt tidsserie

Regionale klimamodeller er endnu ikke præcise nok til at benyttes direkte til evaluering af vandresursen på oplandsniveau (Teutschbein & Seibert, 2012; Ehret m.fl., 2012). Det

er derfor nødvendigt at korrigere modelresultaterne ved hjælp af observeret vandføring for oplandet.

Årlige værdier for modelbaseret vandføring sammenlignes med årlige observerede værdier af samme. For oplande med et tilstrækkeligt antal observationsår, anvendes lineær regression som korrektionsfunktion for at korrigere de årlige modelbaserede vandføringsværdier. For disse oplande rammer HIRHAM5 typisk variationen fra år til år relativt godt (korrelationskoefficienter på 0,8-0,95) men overvurderer størrelsen af denne variation (hældning på 0,2-0,7, altså mindre end 1). Derudover har den lineære korrelation et udgangspunkt forskelligt fra nul.

For nogle oplande er den observerede vandføringstidsserie for kort til at etablere en lineær regression. I disse tilfælde beregnes forholdet mellem observeret og modelbaseret vandføring for hvert år og det gennemsnitlige forhold benyttes til at korrigere den modelbaserede årlige vandføring.

### Statistisk vurdering

Spearman Rho-testen er baseret på ordinal association mellem variable og er en ikkeparametrisk test til undersøgelse af monotone trends i tidsserier. Spearman Rho-testen har samme styrke i udpegning af trends som Mann-Kendall-testen, der ofte benyttes ved test af hydro-meteorologiske tidsserier (Yue et al., 2002).

Omend ikke-parametriske tests ikke kræver at data er normal-fordelte, kræver de dog at data er serielt uafhængige (uden autokorrelation). Ulempen ved Spearman-Rho-testen er at den ikke giver størrelsen af trenden. For at finde denne anvender vi Theil-Sen hældningsestimatet, en robust metode der ikke påvirkes af ekstreme værdier.

## Afgrænsning af oplande

Oplandene er defineret ud fra afvandingsområdet ovenfor hvert udløb, beregnet ved hjælp af standard GIS-værktøjer implementeret i GRASS GIS (Neteler m.fl., 2012). Ud-gangspunktet var en koordinatliste for udløbene (Tabel 1), kombineret med en højde-model for indlandsisen med en opløsning på 30 m (GIMP DEM; Howat m.fl., 2014) og en højdemodel for det isfri område med en opløsning på 5 m (ArcticDEM; Morin m.fl., 2016).

Første trin i oplandsafgrænsningen var en strømretningsberegning udført over GIMP højdemodellen over et større område indeholdende alle oplandene inklusiv både den isdækkede del og den isfri del. Strømretningsberegningsalgoritmen giver placeringen af vandløb som en rasterfil (et grid) og afstrømningsretning for alle grid-celler i GIMP højdemodellen.

Vandløbsrasterfilen blev konverteret til vektorformat og eksporteret til et KML-lag til brug i Google Earth, hvor den beregnede placering af vandløb kunne sammenlignes med visuelt synlige vandløb på Google Earths baggrundsbilledlag. Ved de positioner hvor de beregnede vandløb fra analysen af GIMP højdemodellen ikke matchede de synlige vandløb, editerede vi GIMP højdemodellen manuelt ved indsætning af blokeringer så beregningen gav mere realistiske vandløb. Positionerne for udløbene (Tabel 1) blev efterfølgende justeret så de befandt sig i en grid-celle med et beregnet vandløb. Vi udvalgte her nærmeste grid-celle med et større vandløb. Justeringerne var generelt på 0-5 grid-celler (0-200 m). Med udgangspunkt i de justerede udløbspositioner og den forbedrede vandløbslokalisering/strømretningsberegning udledte vi herefter de enkelte oplande. Denne proces blev iterativt gentaget indtil de beregnede vandløbspositioner var nogenlunde korrekte og oplandene sammenlignelige med eksisterende manuelt udtegnede kort.

Opland ID	Længdegrad (°V)	Breddegrad (°N)
06.g.l	50,21426	64,93224
06.g.ll	50,15527	65,15175
06.g.III	50,14664	65,15954
06.g.IV	49,92027	64,93000
07.d.I	50,33261	65,53874
07.d.II	50,28814	65,47091
07.e	51,31338	66,30535
07.f.I	51,11731	66,67358
07.f.II	49,78297	66,62143

**Tabel 1.** Positionskoordinater for de enkelte oplandes udløb.

Næste trin bestod i en forbedring af beregningen af den isfri del af oplandet, i det GIMPhøjdemodellens 30 m opløsning blev vurderet til at være af for lav opløsning til korrekt oplandsafgrænsning i det kuperede landskab. For den isfri del af de oplande der blev afgrænset med GIMP-højdemodellen, gentog vi derfor processen med ArcticDEM højdemodellen, der har en opløsning på 5 m. Igen tilpassede vi positionen af udløbene til at ligge i de beregnede vandløb og udledte det bagvedliggende opland.

Hvert udløb blev derefter delt op i en isdækket sektor og en landsektor (isfri) ved hjælp af en is/land-maske (Citterio & Ahlstrøm, 2013). Oplandet baseret på ArcticDEM blev skåret til at dække landsektoren og oplandet baseret på GIMP skåret til at dække issektoren. Landsektoren af oplandet (i 5 m opløsning) blev herefter resamplet til 30 m opløsning. Den høje opløsning på 5 m giver en bedre beregning af oplandsafgrænsningen i kuperet terræn, men er unødvendig efter at oplandsafgrænsningen er udført og har meget begrænset indflydelse på det endelige resultat.

Oplandsafgrænsningen blev beregnet ved hjælp af en 8-vejs (D8) entydig strømretningssalgoritme (SFD), hvilket betyder at alt vand fra en grid-celle flyder nedad i den stejleste retning til én og kun én af de 8 tilstødende grid-celler. Vi sammenlignede resultaterne fra SFD med en beregning udført med en multivejs-strømretningssalgoritme (MFD) og forskellen mellem de to var ubetydelig og lå indenfor få grid-celler ved randen af hvert opland.

Resultatet af dette arbejde var endeligt to masker for hvert opland: En landmaske og en ismaske. Med disse kunne næste trin, udledning af vandføring fra en regional klimamodel sættes i gang.

### Fejlanalyse af oplandsafgrænsning

Den ovenstående metode vil ikke nødvendigvis beregne det nøjagtige opland til et givet udløb. For issektoren gælder det at oplandet vil ændre sig, når isens overflade ændrer sig. Tilsvarende er afgrænsningen af et opland på indlandsisen afhængig af isens interne hydrologiske system, der afhænger af isens tykkelse og en række andre faktorer, som fx mængden af tilført smeltevand per tid og den tidsafhængige udvikling af det hydrologiske system ved bunden af isen henover en smeltesæson. En beregning af den isdækkede sektor af oplandet baseret på GIMP højdemodellen på 30 m opløsning anser vi dog for at give en god tilnærmelse af oplandet på indlandsisen. Denne antagelse er baseret både på den nuværende viden på området (fx Ahlstrøm & Petersen m.fl., 2017) og visuel sammenligning med overfladeafstrømningen synligt på Google Earth billedlaget. De synlige smeltevandsfloder fulgte omtrent den ovenfor beregnede oplandsafgrænsning. Alternativet ville være inddragelse af den bedste eksisterende istykkelsesmodel (Morlighem m.fl., 2017) der fortsat ikke har tilstrækkelig opløsning og underliggende datadækning til umiddelbar anvendelse på oplandsskala (Morlighem, personlig kommunikation; Ahlstrøm & Petersen m.fl., 2017). Landsektoren af oplandene havde store og signifikante fejl i første beregning baseret på GIMP højdemodellens 30 m opløsning, hvilket var årsagen til inddragelsen af ArcticDEM højdemodellen med dens højere opløsning på 5 m. Brugen af denne gav en mere korrekt oplandsafgrænsning, men dog stadig med fejl. Helt specifikt er der dele af ArcticDEM højdemodellen, der simpelthen ikke indeholder værdier ("NULL"-værdier) og i vores beregning blev sat til værdien 0 m højde. Når disse forekommer udenfor et opland har det naturligvis ingen indflydelse og påvirker ikke resultatet. Når de forekommer indenfor et opland, har det heller ingen indflydelse, da strømretningsalgoritmen behandler disse "huller" som søer og søer ikke har indflydelse på oplandets samlede vandbudget (som beskrevet i næste afsnit). Når et datahul derimod ligger i forbindelse med en egentlig oplandsgrænse, vil algoritmen beregne en strømning rundt om denne. Ved sammenligning mellem ArcticDEM og de beregnede oplandsgrænser, skete dette i ét tilfælde og resulterede i en fejl på i alt ca. 100 grid-celler, svarende til 2,5 km<sup>2</sup>; en meget lille del af det aktuelle opland.

### Modelbaseret vandføring

Vandføringen gennem udløbet for hvert opland blev beregnet for perioden 1980-2014, baseret på resultater fra den regionale klimamodel HIRHAM5 (Langen m.fl., 2017) der giver følgende variable på daglig tidslig opløsning:

- Overfladeafstrømning (is og is+land)
- Regn
- Snefald
- Snesmeltning
- Fordampning

Modellens output blev omregnet fra sin oprindelige 0,5° x 0,5° opløsning til et grid med 5,5 km opløsning i samme kortprojektion som GIMP og ArcticDEM højdemodellerne. Vi benyttede primært overfladeafstrømningen fra modellen, men udregnede også nedbøren over issektoren i hvert opland som:

Nedbør = fordampning + regn + snefald

De projicerede 5,5 km grids med HIRHAM5 output for hhv. overfladeafstrømning og nedbør over den isdækkede del blev yderligere opdelt til GIMP højdemodellens 30 m grid. HIRHAM5-modellens grovere opløsning indebærer at dens ismaske ikke vil passe med den her anvendte ismaske på 30 m opløsning. For at udfylde de manglende værdier for modelafledt afstrømning og nedbør for den højopløste ismaske, anvendte vi et 3 x 3 gridcelle box-filter, hvor hver celle med manglende værdi blev udfyldt med gennemsnittet af de (maksimalt 8) valide naboceller. Denne metode vil give et konservativt estimat af afstrømningen, da de manglende celler udgør den lavestliggende del af isens rand, hvor afsmeltningen må forventes at være større end ved de højereliggende celler hvorfra randværdierne ekstrapoleres fra.

Nedbøren blev kun beregnet for den isdækkede sektor af oplandene, da HIRHAM5-nedbøren for de generelt små landsektorer gav meget støjfyldte datasæt af minimal betydning for den samlede afstrømning. Dette er igen et konservativt sat valg, der vil resultere i en smule mindre beregnet afstrømning.

Hver 5,5 km celle blev evalueret med den fintopløste ismaske på 30 m og en isfraktion mellem 1 og 0 tildelt alt efter graden af isdække. Afstrømningen per areal for 30 m cellerne blev herefter skaleret med denne arealbaserede fraktion. Reelt set giver dette et konservativt estimat, da en 50/50 opdeling af areal mellem is/land dermed skaleres med 0,5 selvom det er overvejende sandsynligt at størstedelen af afstrømningen fra en sådan celle kommer fra den isdækkede halvdel. Antallet af grænseceller er dog ret begrænset i forhold til det samlede antal celler i et opland og indflydelsen på den beregnede afstrømning er derfor relativt lav. Med ovenstående valg på plads, udregnedes den modelbaserede daglige totale vandføring fra hvert opland som summen af overfladeafstrømning og nedbør. Disse modelbaserede tidsserier blev brugt som udgangspunkt for udfyldning af de målte tidsserier i år uden observationer som beskrevet i det følgende. Til dette formål blev der som udgangspunkt etableret en sammenhæng mellem målte og modelbaserede tidsserier, så sidstnævnte blev kalibreret med observationer. Derfor er det ikke afgørende om de absolutte værdier for vandføringen fra modellen er korrekte, så længe modellen blot formår at fange variabiliteten i tidsserien.

# Vandkraftpotentiale 06.g

Vandkraftpotentialet 06.g er sammensat af fire naturlige oplande markeret som (I), (II), (II), og (IV) (se Figur 9).



**Figur 9.** Kort over de fire naturlige oplande markeret med romertal I-IV, der tilsammen udgør vandkraftpotentialet 06.g. Hvert delopland er opdelt i en blå isdækket del og en grøn isfri del, med et rødt kryds til markering af udløbet.

### Monitering af vandresursen

Undersøgelse af vandkraftpotentiale 06.g blev igangsat i 1974 af Kryolitselskabet Øresund som en mulig energiforsyning til en potentiel mine ved den nærliggende jernforekomst ved Isukasia (Kryolitselskabet Øresund 1984). Moniteringen af vandresursen blev overtaget af Grønlands Tekniske Organisation (GTO) i 1985 og afsluttet i 1989. I 2008 blev moniteringen genoptaget på initiativ af ALCOA på grund af fornyet interesse for vandkraftpotentialet som energiforsyning til energikrævende virksomhed. Moniteringen blev overtaget af Asiaq, Grønlands Forundersøgelser, i 2013 og foretages fortsat i skrivende stund. Moniteringen har været koncentreret om opland (I) der bidrager med omkring 82% af den samlede vandresurse for vandkraftpotentialet (se under Vandresurse).

Hydrometriske stationer har været etableret ved hvert af de fire oplande, men har været aktive over forskellige tidsrum. Q/h-relationer er blevet etableret for hvert opland baseret på manuelle vandføringsmålinger (Tabel 1). For opland 06.g.I og 06.g.II er Q/h-

relationerne baseret på et rimeligt antal vandføringsmålinger, der dækker vandføringsspændet nogenlunde (ekstrapolation af Q/h-relationen er benyttet for mindre end 15% af den samlede vandføringsvolumen). For opland 06.g.III og 06.g.IV danner de få vandføringsmålinger en relativt ringe basis for Q/h-relationen og særligt for 06.g.III mangler der især målinger ved lav vandføring. Dog bidrager opland 06.g.III og 06.g.IV kun med omkring 10% af vandresursen, hvilket betyder at usikkerheden i deres Q/h-relationer ikke har den store indflydelse på evalueringen af den samlede vandresurse for vandkraftpotentialet.

En oversigt over datadækningen for vandføringstidsserierne for hvert opland er givet i Figur 10.

Opland	Manuelle vandførings-	Del af den samlede vandføringsvolumen fundet ved ekstra- polation af Q/h-relationen eller dataudfyldning, %		
	målinger	Opadgående ekstrapolation	Nedadgående ekstrapolation	Data- udfyldning
06.g.l	14	3 %	10 %	4 %
06.g.ll	13	9 %	1 %	1%
06.g.III	4	4 %	31 %	1%
06.g.IV	5	9 %	2 %	0 %

**Tabel 2.** Basis for Q/h-relationen for hvert opland og delen af den samlede vandføringsvolumen fundet

 ved ekstrapolation af Q/h-relationen eller dataudfyldning.



**Figur 10.** Datadækning for den målte tidsserie for oplandene i vandkraftpotentialet 06.g. Perioder med data er vist med mørkegrå, mens længere perioder med dataudfyldning er vist med lysegrå (for en beskrivelse af dataudfyldningsmetoden, se metodeafsnittet).

### Etablering af tidsserien for 1980-2014

Ingen af oplandene har en vandføringstidsserierne der dækker hele perioden fra 1980 til 2014 (se Figur 10). Derfor bruges HIRHAM5-afstrømningsdata og vandføringsdata fra det nærliggende opland 07.d.I til at supplere de målte vandføringstidsserier.

06.g.I: Den isfri del af opland 06.g.I bidrager med en signifikant del af den totale vandføring svarende til 45% ifølge HIRHAM5. Dette er i kontrast til de andre oplande, hvor afstrømningen fra de isdækkede dele er dominerende. De årlige vandføringsværdier fra 06.g.I korrelerer derfor ikke med nabooplandet 06.g.II. Den målte tidsserie og HIRHAM5tidsserien overlapper med fem år og korrelation mellem dem er relativt god (R<sup>2</sup> = 0.40). Den årlige vandføringstidsserie fra 1980-2014 er sammensat af målte data suppleret med årlige afstrømningsværdier fra HIRHAM5, som er korrigeret ved hjælp af lineær regression.

06.g.II: Smeltevand fra Grønlands indlandsis dominerer vandføringen for opland 06.g.II. Da vi har tilgængelige HIRHAM5-resultater for afstrømningen fra den isdækkede del af oplandet i en to år længere periode end for den isfri del (frem til og med 2016) anvendes denne for at etablere den bedst mulige korrelation. Den målte tidserie og HIRHAM5 tidsserien overlapper med 17 år og korrelationen mellem dem er særdeles god (R<sup>2</sup> = 0.93). Den målte vandføring fra perioden 2008-2012 er ikke offentligt tilgængelig og må ikke publiceres. Den årlige vandføringstidsserie fra 1980-2014 er sammensat af de målte data der er offentligt tilgængelige suppleret med årlige afstrømningsværdier fra HIR-HAM5, som er korrigeret ved hjælp af lineær regression.

06.g.III: Den overvejende del af den målte vandføringstidsserie for opland 06.g.III er indsamlet før 1980 hvor HIRHAM5-resultaterne er tilgængelige fra. Derfor overlapper målingerne og HIRHAM5 kun over en to-årig periode, hvilket er for lidt at etablere en pålidelig regression. Imidlertid korrelerer vandføringen fra opland 06.g.III og vandføringen fra nabooplandet 06.g.II særdeles godt (R<sup>2</sup> = 0.998), baseret på data fra en fem-årig periode. Den årlige vandføringstidsserie fra 1980-2014 er sammensat af målte data suppleret med data fra nabooplandets (06.g.II) vandføringstidsserie korrigeret ved hjælp af lineær regression.

06.g.IV: Den målte vandføringstidsserie for opland 06.g.IV dækker blot sommeren 1975 og sommeren 1976 (Figur 10) og overlapper dermed ikke med resultaterne fra HIR-HAM5. Data fra 06.g.IV overlapper derimod med målt vandføring fra opland 06.g.I; men hvor vandføringen fra 06.g.IV, i modsætning til vandføringen fra 06.g.I, er større i 1975 end i 1976, virker det usandsynligt at en korrigeret vandføringstidsserie fra 06.g.I vil være et godt estimat for vandføringen fra 06.g.IV. Uoverensstemmelsen er sandsynligvis forårsaget af at afsmeltning fra isen er en meget større del af bidraget til vandføringen fra 06.g.IV end fra 06.g.I. Derfor kigges der i stedet på opland 07.d.I (se afsnittet om vandkraftpotentialet 07.d), som er lokaliseret omkring 40 km nord for 06.g.IV. Her var vandføringen ligeledes større i 1975 end i 1976. Den gennemsnitlige ratio mellem de årlige vandføringsværdier for 06.g.IV og 07.d for disse to år er blevet brugt til at estimere den årlige vandføringstidsserie fra 1980-2014 for opland 06.g.IV ud fra tidsserien fra 07.d.

#### Vandresursen

Baseret på vandføringstidsserierne for 1980-2014 for de fire oplande er den gennemsnitlige vandresurse for vandkraftpotentialet 06.g blevet beregnet til at udgøre 1,08 km<sup>3</sup> (se Tabel 3). De 8 højeste årlige resurseværdier forekommer i perioden 2003-2014. Den årlige vandresurse udviser et statistisk signifikant, positivt trend (med signifikansniveau p=0,01) i en Spearman-Rho-test. Trenden for vandføringstidsserien beregnes til en stigning på 0,008 km<sup>3</sup>/år (Theil & Sen slope estimator).

Opland	Årlig vandresurse, km <sup>3</sup>			Bidrag til
	Gennemsnit	Maksimum	Minimum	vandresurse, %
06.g.I	0,10	0,12	0,08	9
06.g.II	0,88	1,57	0,58	82
06.g.III	0,06	0,08	0,04	5
06.g.IV	0,04	0,08	0,03	4
06.g total	1,08	1,85	0,75	

 Tabel 3. Vandresursen for vandkraftpotentialet 06.g.



**Figur 11.** Den årlige vandføring fra vandkraftpotentialet 06.g med angivelse af datakilde som følger; "Obs (primært)": Hovedsageligt baseret på målte data, "Obs (i nogen grad): Delvis baseret på målte data, "RCM": Baseret på regression mellem klimamodelresultater og målte data fra andre år.



**Figur 12.** *Middelhydrografer for afstrømningen fra vandkraftpotentialet for 06.g for henholdsvis perioden 1980-2002 (blå) og perioden 2003-2014 (rød). Forskellen mellem de to er tegnet ind som en sort kurve.* 



**Figur 13.** Standardafvigelsen for den daglige afstrømning (afbildet i Figur 12) på en given dag på året for perioden 1980-2002 (grøn) og for perioden 2003-2014 (lilla). Forskellen mellem de to er tegnet ind som en sort kurve.

# Vandkraftpotentialet 07.d



Vandkraftpotentialet 07.d Søndre Isortup Isua er baseret på to naturlige oplande vist (se Figur 14).

**Figur 14.** Kort over de to naturlige oplande markeret med romertal I-II, der tilsammen udgør vandkraftpotentialet 07.d. Hvert delopland er opdelt i en blå isdækket del og en grøn isfri del, med et rødt kryds til markering af udløbet.

### Monitering af vandresursen

Undersøgelse af vandkraftpotentiale 07.d blev igangsat I 1974 af Kryolitselskabet Øresund (Kryolitselskabet Øresund 1984) og afsluttet i 1983. I 2007 blev moniteringen genoptaget på initiativ af ALCOA på grund af fornyet interesse for vandkraftpotentialet som energiforsyning til energikrævende virksomhed. Moniteringen blev overtaget af Asiaq, Grønlands Forundersøgelser, i 2009 og foretages fortsat i skrivende stund.

I den tidlige del af moniteringsperioden fra 1974 til 1983 var det kun opland 07.d.I der var inkluderet i måleprogrammet. Moniteringen af både opland 07.d.I og 07.d.II har stået på siden 2007. Q/h-relationer er blevet etableret for hvert opland baseret på manuelle vandføringsmålinger, se Tabel 3. For opland 07.d.I er Q/h-relationen baseret på et rimeligt antal vandføringsmålinger. Præcisionen af den resulterende vandføringstidsserie ville dog forbedres, hvis der var lavet flere manuelle vandføringsmålinger ved høj vandføring, da det ville reducere brugen af ekstrapolerede værdier fra Q/h-relationen. For opland 07.d.II er antallet af vandføringsmålinger der danner basis for Q/h-relationen i den lave ende, men dækningen af den normalt forekommende vandføring er rigtig god (mindre end 3% af det totale volumen er fundet ved ekstrapolation). En oversigt over datadækningen for vandføringstidsserierne for hvert opland er givet i Figur 15.

Opland Manu vandf målin	Manuelle vandførings-	Del af den samlede vandføringsvolumen fundet ved ekstra- polation af Q/h-relationen eller dataudfyldning, %		
	målinger	Opadgående ekstrapolation	Nedadgående ekstrapolation	Data- udfyldning
07.d.I	17	14 %	2 %	1%
07.d.II	9	0.3 %	2 %	0.3 %

**Tabel 4.** Basis for Q/h-relationen for hvert opland og delen af den samlede vandføringsvolumen fundet ved ekstrapolation af Q/h-relationen eller dataudfyldning.



**Figur 15.** Datadækning for den målte tidsserie for oplandene i vandkraftpotentialet 07.d. Perioder med data er vist med mørkegrå, mens længere perioder med dataudfyldning er vist med lysegrå (for en beskrivelse af dataudfyldningsmetoden, se metodeafsnittet).

#### Etablering af tidsserien for 1980-2014

Ingen af oplandene har en vandføringstidsserie der dækker hele perioden fra 1980 til 2014 (se Figur 15). Derfor bruges HIRHAM5-afstrømningsdata til at supplere den målte vandføringstidsserie.

07.d.I: Smeltevand fra Grønlands indlandsis dominerer vandføringen for opland 07.d.I. Da vi har tilgængelige HIRHAM5-resultater for afstrømningen fra den isdækkede del af oplandet i en to år længere periode end for den isfri del (frem til og med 2016) anvendes denne for at etablere den bedst mulige korrelation. Den målte tidserie og HIRHAM5 tidsserien overlapper med 11 år og korrelationen mellem dem er særdeles god (R<sup>2</sup> = 0.95). Den målte vandføring fra perioden 2007-2008 er ikke offentligt tilgængelig og må ikke publiceres. Den årlige vandføringstidsserie fra 1980-2014 er sammensat af de målte data, der er offentligt tilgængelige suppleret med årlige afstrømningsværdier fra HIR-HAM5, som er korrigeret ved hjælp af lineær regression. 07.d.II: Målingerne fra opland 07.d.II dækker en data serie på 10 år. Korrelationen mellem 07.d.II og 07.d.I er lidt bedre ( $R^2 = 0.88$ ) end korrelationen mellem 07.d.II og HIR-HAM5 ( $R^2 = 0.84$ ). Derfor bruges data fra 07.d.I til at udfylde hullerne i tidsserien for 07.d.II. Den målte vandføring fra perioden 2007-2008 er ikke offentligt tilgængelig og må ikke publiceres. Den årlige vandføringstidsserie fra 1980-2014 er sammensat af de målte data, der er offentligt tilgængelige, suppleret med afstrømningsværdier fra 07.d.I, som er korrigeret ved hjælp af lineær regression.

#### Vandresursen

Baseret på vandføringstidsserierne for 1980-2014 for de to oplande er den gennemsnitlige vandresurse for vandkraftpotentialet 07.d blevet beregnet til at udgøre 1,17 km<sup>3</sup> (se Tabel 5). De 8 højeste årlige vandresurseværdier forekommer i perioden 2003-2014. Den årlige vandresurse udviser en statistisk signifikant, positivt trend (med signifikansniveau p=0,001) i en Spearman-Rho-test. Trenden for vandføringstidsserien beregnes til en stigning på 0,009 km<sup>3</sup>/år (Theil & Sen slope estimator).

Opland	Årlig vandresurse, km <sup>3</sup>			Bidrag til
	Gennemsnit	Maksimum	Minimum	vandresurse, %
07.d.I	1,00	1,94	0,71	86
07.d.II	0,17	0,28	0,13	14
07.d total	1,17	2,22	0,84	

 Tabel 5. Vandresursen for vandkraftpotentialet 07.d.



**Figur 16.** Den årlige vandføring fra vandkraftpotentialet 07.d med angivelse af datakilde som følger; "Obs": Målte data, "Obs (primært)": Hovedsageligt baseret på målte data, "Obs (i nogen grad): Delvis baseret på målte data, "RCM": Baseret på regression mellem klimamodelresultater og målte data fra andre år.



**Figur 17.** *Middelhydrografer for afstrømningen fra vandkraftpotentialet for 07.d for henholdsvis perioden 1980-2002 (blå) og perioden 2003-2014 (rød). Forskellen mellem de to er tegnet ind som en sort kurve.* 



**Figur 18.** Standardafvigelsen for den daglige afstrømning (afbildet i Figur 17) på en given dag på året for perioden 1980-2002 (grøn) og for perioden 2003-2014 (lilla). Forskellen mellem de to er tegnet ind som en sort kurve.

# Vandkraftpotentialet 07.e

Vandkraftpotentialet 07.e er baseret på udnyttelsen af oplandet til søen Tasersiaq (se Figur 19).



**Figur 19.** Kort over oplandet for vandkraftpotentialet 07.e. Oplandet er opdelt i en blå isdækket del og en grøn isfri del, med et rødt kryds til markering af udløbet.

### Monitering af vandresursen

Undersøgelse af vandkraftpotentialet 07.e blev igangsat I 1975 af Grønlands Tekniske Organisation (GTO) og har været i gang lige siden. I dag bliver moniteringen foretaget af Asiaq, Grønlands Forundersøgelser.

Q/h-relationen for oplandet 07.e er særdeles godt underbygget da det er baseret på 37 manuelle vandføringsmålinger, hvilket dækker vandføringsspændet fra oplandet godt, se Tabel 6.

En oversigt over datadækningen for oplandets vandføringstidsserie er givet i Figur 20.

Opland	Manuelle vandførings- målinger	Del af den samlede polation af Q/h-rela	Del af den samlede vandføringsvolumen fundet ved ekstra- polation af Q/h-relationen eller dataudfyldning, %		
		Opadgående ekstrapolation	Nedadgående ekstrapolation	Data- udfyldning	
07.e	37	6 %	1%	1%	

**Tabel 6.** Basis for Q/h-relationen for oplandet og delen af den samlede vandføringsvolumen fundet ved ekstrapolation af Q/h-relationen eller dataudfyldning.



**Figur 20.** Datadækning for den målte tidsserie for vandkraftpotentialet 07.e. Perioder med data er vist med mørkegrå, mens længere perioder med dataudfyldning er vist med lysegrå (for en beskrivelse af dataudfyldningsmetoden, se metodeafsnittet).

### Etablering af tidsserien for 1980-2014

Selvom oplandet 07.e er blevet moniteret siden 1975 er vandføringstidsserien ikke kontinuert på grund af dataudfald. Derfor bruges HIRHAM5-afstrømningsdata til at supplere den målte vandføringstidsserie.

07.e: Vandføringstidsserien fra 07.e er domineret af høje vandføringer om sommeren, når temperaturen og dermed afsmeltningen er høj. Derudover forekommer der lejlighedsvise korte perioder af typisk en uges varighed, hvor vandføringen pludselig stiger markant for derefter hurtigt at aftage igen. Disse flomme kan optræde på alle tidspunkter af året, men er mest almindelige i efteråret. Årsagen skal findes i lejlighedsvise jøkelløb, hvor en isdæmmet gletsjersø pludselig tømmes. Den isdæmmede gletsjersø er beliggende opstrøms på positionen N66°09', W050°54'. Tiden mellem jøkelløbene fra gletsjersøen er normalt et par år. Opmagasineringen af smeltevand fra et år til det næste er ikke inkluderet i HIRHAM5-modellen. Ved regressionen af de målte og modellerede årlige vandføringsværdier er volumenet af vand frigivet gennem jøkelløb fra gletsjersøen fjernet fra den målte vandføringstidsserie (se Ahlstrøm & Petersen, m.fl., 2017). Den målte vandføringstidsserie og HIRHAM5-tidsserien overlapper med 29 år og korrelation mellem dem er særdeles god (R<sup>2</sup> = 0,90).

Ved år med dataudfald er de manglende årsværdier fundet fra årlige HIRHAM5-vandføringsværdier, som er korrigeret ved hjælp af lineær regression. Herefter er volumenet af vand frigivet ved jøkelløb fra gletsjersøen i det pågældende år blevet tilføjet. Ved at undersøge relationen mellem volumen af vand frigivet ved jøkelløb fra gletsjersøen og summen af positive graddage mellem hvert gennembrud og sammenholde dette med Landsat-satellitbilleder har vi identificeret yderligere to jøkelløb, som ikke er dokumenteret i vandføringstidsserien grundet dataudfald. Volumenet af vand frigivet under jøkelløb fra gletsjersøen falder over tid (R<sup>2</sup> = 0,75) grundet udtynding af den blokerende gletsjer. Volumenet af vand frigivet under jøkelløb fra gletsjersøen, der ikke er registeret i den målte vandføringstidsserie er baseret på ovennævnte relation.

#### Vandresursen

Baseret på vandføringstidsserierne for 1980-2014 er den gennemsnitlige vandresurse for vandkraftpotentialet 07.e beregnet til at udgøre 2,78 km<sup>3</sup> (se Tabel 7). De 8 højeste årlige resurseværdier forekommer i perioden 2003-2014. Den årlige vandresurse udviser et statistisk signifikant, positivt trend (med signifikansniveau p=0,0005) i en Spearman-Rho-test. Trenden for vandføringstidsserien beregnes til en stigning på 0,056 km<sup>3</sup>/år (Theil & Sen slope estimator).

Opland	Årlig vandresurse, km <sup>3</sup>			
	Gennemsnit	Maksimum	Minimum	
07.e	2,78	6,81	0,61	

 Tabel 7. Vandresursen for vandkraftpotentialet 7.e.



**Figur 21.** Den årlige vandføring fra vandkraftpotentialet 07.e med angivelse af datakilde som følger; "Obs": Målte data, "RCM": Baseret på regression mellem klimamodelresultater og målte data fra andre år.



**Figur 22.** *Middelhydrografer for afstrømningen fra vandkraftpotentialet for 07.e for henholdsvis perioden 1980-2002 (blå) og perioden 2003-2014 (rød). Forskellen mellem de to er tegnet ind som en sort kurve.* 



**Figur 23.** Standardafvigelsen for den daglige afstrømning (afbildet i Figur 22) på en given dag på året for perioden 1980-2002 (grøn) og for perioden 2003-2014 (lilla). Forskellen mellem de to er tegnet ind som en sort kurve.

# Vandkraftpotentialet 07.f

Vandkraftpotentialet 07.f Umiiviit Isua er sammensat af to naturlige oplande markeret som 07.f.l og 07.f.ll (se Figur 24).



**Figur 24.** Kort over de to naturlige oplande markeret med romertal I-II, der tilsammen udgør vandkraftpotentialet 07.f. Hvert delopland er opdelt i en blå isdækket del og en grøn isfri del, med et rødt kryds til markering af udløbet.

#### Monitering af vandresursen

Undersøgelse af vandkraftpotentialet 07.f blev igangsat I 1975 af Grønlands Tekniske Organisation (GTO), hvor en hydrometrisk station blev etableret ved floden i opland 07.f.II. Moniteringen af vandresursen i opland 07.f.II blev afsluttet i efteråret 1976. En anden hydrometrisk station blev etableret i opland 07.f.I i 1994 og hjemtaget igen i år 2002.

Q/h-relationer er blevet etableret for hvert opland baseret på manuelle vandføringsmålinger (se Tabel 8). Begge oplandes Q/h-relationer er baseret på et meget sparsomt antal vandføringsmålinger. Ydermere mangler opland 07.f.I manuelle vandføringsmålinger ved lav vandføring.

En oversigt over datadækningen for vandføringstidsserierne for hvert opland er givet i Figur 25.

Opland Manuelle vandførings- målinger	Manuelle vandførings-	Del af den samlede vandføringsvolumen fundet ved ekstra- polation af Q/h-relationen eller dataudfyldning, %		
	målinger	Opadgående ekstrapolation	Nedadgående ekstrapolation	Data- udfyldning
07.f.I	6	6 %	32 %	3 %
07.f.II	3	6 %	2 %	

**Tabel 8.** Basis for Q/h-relationen for hvert opland og delen af den samlede vandføringsvolumen fundet ved ekstrapolation af Q/h-relationen eller dataudfyldning.



**Figur 25.** Datadækning for den målte tidsserie for oplandene i vandkraftpotentialet 07.f. Perioder med data er vist med mørkegrå, mens længere perioder med dataudfyldning er vist med lysegrå (for en beskrivelse af dataudfyldningsmetoden, se metodeafsnittet).

### Etablering af tidsserien for 1980-2014

Ingen af oplandene har en vandføringstidsserierne der dækker hele perioden fra 1980 til 2014 (se Figur 25).

07.f.I: Den isfri del af opland 07.f.I bidrager med en signifikant del af den totale afstrømning svarende til 52% ifølge HIRHAM5. Dette er i kontrast til nabooplandet 07.e, hvor afstrømningen fra den isdækkede del er dominant. De årlige vandføringsværdier fra 07.f.I korrelerer derfor ikke med data fra 07.e. Den målte tidsserie og HIRHAM5-tidsserien overlapper med seks år men korrelation mellem dem er ringe (R<sup>2</sup> = 0.04). En noget bedre korrelation (R<sup>2</sup> = 0.42) kan findes mellem den målte tidsserie og en beregnet sum af HIRHAM5-afstrømning fra den isdækkede del af oplandet og et estimat for afstrømningen fra den isfri del af oplandet baseret på nedbørsdata fra Kangerlussuaq ganget med arealet af det isfrie opland. Dette tyder på at HIRHAM5-afstrømningen fra det isfri land kan have stor usikkerhed, men samtidig er den målte vandføringstidsserie for opland 07.f.I baseret på en svag Q/hrelation (se tidligere afsnit). Det blev derfor valgt at basere den årlige vandføringstidsserie fra 1980-2014 på de målte data, suppleret med årlige afstrømningsværdier fra HIR-HAM5 som er korrigeret med det gennemsnitlige forhold mellem målte og modelbaserede årlige vandføringsværdier.

07.f.II: Den målte vandføringstidsserie for opland 07.f.II dækker sommeren 1975 og 1976 (Figur 25) og overlapper dermed ikke med HIRHAM5 data. Til alt held har opland 07.e, der ligger 40 km syd for 07.f.II, en overlappende tidsserie. Ydermere er begge oplande domineret af smeltevand fra Grønlands indlandsis. Det gennemsnitlige forhold mellem de årlige vandføringsværdier fra de to oplande 07.f.II og 7.e er brugt til at justere den årlige tidsserie fra 1980-2014 for opland 07.e således at den udgør et estimat af den årlige vandføringstidsserie for opland 7.f.II.

### Vandresursen

Baseret på vandføringstidsserierne for 1980-2014 for de to oplande er den gennemsnitlige vandresurse for vandkraftpotentialet 07.f beregnet til at udgøre 1,35 km<sup>3</sup> (se Tabel 9). Det skal her bemærkes at vandresursen for opland 07.f er baseret på meget korte målte tidsserier og at Q/h-relationerne, der er brugt til at udregne vandføringstidsserien, ikke er veldokumenterede.

De 8 højeste årlige vandresurseværdier forekommer i perioden 2003-2014. Den årlige vandresurse udviser et statistisk signifikant, positivt trend (med signifikansniveau p<0,0005) i en Spearman-Rho-test. Trenden for vandføringstidsserien beregnes til en stigning på 0,025 km<sup>3</sup>/år (Theil & Sen slope estimator).

Opland	Årlig vandresurse, km <sup>3</sup>			Bidrag til
	Gennemsnit	Maksimum	Minimum	vandresurse, %
07.f.I	0,26	0,35	0,20	19
07.f.II	1,09	2,64	0,25	81
07.f total	1,35	2,99	0,49	

 Tabel 9. Vandresursen for vandkraftpotentialet 07.f.



**Figur 26.** Den årlige vandføring fra vandkraftpotentialet 07.f med angivelse af datakilde som følger; "Obs (i nogen grad): Delvis baseret på målte data, "Obs (fra opland nærved)": Baseret på regression mellem målte data fra et naboopland og målte data fra andre år, "RCM": Baseret på regression mellem klimamodelresultater og målte data fra andre år.



**Figur 27.** *Middelhydrografer for afstrømningen fra vandkraftpotentialet for 07.f for henholdsvis perioden 1980-2002 (blå) og perioden 2003-2014 (rød). Forskellen mellem de to er tegnet ind som en sort kurve.* 



**Figur 28.** Standardafvigelsen for den daglige afstrømning (afbildet i Figur 27) på en given dag på året for perioden 1980-2002 (grøn) og for perioden 2003-2014 (lilla). Forskellen mellem de to er tegnet ind som en sort kurve.

### Konklusion

Som dokumenteret her og i Ahlstrøm & Petersen m.fl. (2017) har de tilgængelige vandresurser i Sydvestgrønland ændret sig markant over de sidste ti år. Analysen af den bagvedliggende årsag udført i Ahlstrøm & Petersen m.fl. (2017) tyder på at sommerens luftmasser over området i stigende grad har sin oprindelse længere sydpå end tidligere og dermed fører mere varme og fugtighed med sig. Dette fører primært til en stigende afsmeltning på indlandsisens overflade, hvilket har en afgørende indflydelse på de store vandkraftpotentialer hvor vandresursen overvejende afhænger af mængden af smeltevand.

Ændringerne i den generelle atmosfæriske cirkulation, der forårsager en intensiveret transport af varme og fugtighed på tværs af breddegraderne, menes at skyldes den globale opvarmning. På oplandsniveau er resultatet af dette en væsentligt større årlig vandføring i gennemsnit og en lidt længere smeltesæson, men også en væsentlig højere variabilitet i vandføringen. Alle disse parametre bør inddrages ved efterfølgende overvejelser om udnyttelse af vandresursen til vandkraft. Selvom der er påpeget en sammenhæng med globale klimaforandringer, skal det også understreges at en del af disse klimaforandringer følger den naturlige variabilitet, fx i havenes cirkulationsmønstre. Ved en eventuel undersøgelse af vandresursens fremtidige udvikling vil det være nødvendigt at inddrage modelresultater baseret på sandsynlige klimascenarier der indeholder viden om både naturlige og menneskeskabte klimapåvirkninger.

I denne opdaterede vurdering af vandresursen for de fire store vandkraftpotentialer i Sydvestgrønland, industripotentialerne 06.g, 07.d, 07.e og 07.f, ser vi den samme overordnede udvikling mod større vandføring og højere variabilitet for de seneste ti år, dokumenteret i Figur 29. Dog er tendensen kraftigere for de to nordligste af potentialerne (07.e og 07.f) der er beliggende på læsiden af en topografisk barriere og dermed er mindre påvirket af nedbør og i endnu højere grad er følsom for øgede smeltevandsmængder fra indlandsisen (se Tabel 10 og 11). Vurderingen dækker udviklingen over perioden 1980-2014, men data fra potentialet 07.e for 1975-1979 publiceret i Ahlstrøm & Petersen m.fl. (2017) ændrer ikke ved denne konklusion. De to tabeller 10 og 11 beskriver den absolutte og den relative stigning i vandresursen fra to tidligere perioder, nemlig 1980-2002 (Tabel 10) og 1980-1991 (Tabel 11), og frem til perioden 2003-2014. Den senere periode er udvalgt fordi den er identificeret som en mulig ny klimatilstand i Ahlstrøm & Petersen m.fl. (2017). Perioden 1980-2002 repræsenterer blot alle de år hvor resultater fra før klimaskiftet i 2003 foreligger, mens perioden 1980-1991 er taget med for at give et sammenligningsgrundlag på oplandsniveau med den indledende beregning af udviklingen for hele Sydvestgrønlands vandresurse.



**Figur 29.** Den årlige vandføring i perioden 1980-2014 som estimeret i denne rapport. De to grafer har forskellig skala. Ændringen i vandføringen efter 2002 er kvantificeret I Tabel 10.

Potentiale	Vandføring km³/år 1980-2002	Vandføring km³/år 2003-2014	Stigning i %
06.g	0,97	1,29	33
07.d	1,03	1,43	38
07.e	2,27	3,77	66
07.f	1,12	1,78	59

**Tabel 10.** Ændringen i vandføring for de fire vandkraftpotentialer fra perioden 1980-2002 til perioden 2003-2014.

Potentiale	Vandføring km³/år 1980-1991	Vandføring km <sup>3</sup> /år 2003-2014	Stigning i %
06.g	0,99	1,29	31
07.d	1,03	1,43	38
07.e	2,19	3,77	72
07.f	1,09	1,78	63

**Tabel 11.** Ændringen i vandføring for de fire vandkraftpotentialer fra perioden 1980-1991 til perioden 2003-2014.

En ændring i vandresursen er ikke ensbetydende med en tilsvarende ændring i vandkraftpotentialets mulige energiproduktion. Her har forholdet mellem den årlige vandføring og størrelsen på det mulige magasin indflydelse og forårsager en ikke-lineær sammenhæng gennem den resulterende reguleringsfaktor. Dertil kommer en række tekniske antagelser omkring forventet virkningsgrad, faldhøjde, rør og turbinetype, og effektiv driftstid pr. år. Dog vil en øget vandresurse gennemgående give en lavere reguleringsgrad og dermed en lavere reguleringsfaktor, hvilket vil betyde en mindre effektiv udnyttelse af den givne vandresurse. Det er derfor muligt den i denne rapport dokumenterede relative stigning i vandresursen vil resultere i en lavere relativ stigning i den teoretisk mulige energiproduktion.

# Litteraturliste

Ahlstrøm, A. P., D. Petersen, R. S. Fausto, P. L. Langen (2017) *En analyse af behovet for en ny kortlægning af Grønlands vandkraftresurser*, GEUS-Notat 10-NA-17-01, 10 pp.

Ahlstrøm, A.P.\*, D. Petersen\*, P.L. Langen, M. Citterio, J.E. Box (2017) Abrupt shift in the observed runoff from the southwestern Greenland ice sheet, Science Advances, 3: e1701169.

AMAP (2017) *Snow, Water, Ice and Permafrost. Summary for Policy-makers*, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 20 pp.

Citterio, M. and A.P. Ahlstrøm (2013) *Brief communication: The aerophotogrammetric map of Greenland ice masses*, The Cryosphere, 7, 445-449, 2013, doi:10.5194/tc-7-445-2013.

Ehret, U., E. Zehe, V. Wulfmeyer, K. Warrach-Sagi and J. Liebert (2012) *Should we apply bias correction to global and regional climate model data?* Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 3391–3404, 2012, doi:10.5194/hess-16-3391-2012.

Howat, I.M., A. Negrete, B.E. Smith (2014) *The Greenland Ice Mapping Project (GIMP) land classification and surface elevation data sets,* The Cryosphere 8 (4), 1509-1518, doi: 10.5194/tc-8-1509-2014.

International Hydropower Association (2017) *2017 Hydropower Status Report*, London, UK, 81 pp.

ISO 748 *Measurements of liquid flow in open channels* – *velocity-area methods,* International standard. Third Edition. 1997-08-01.

ISO 1100-2 *Measurement of liquid flow in open channels. Part 2: Determination of the stage-discharge relation*, International standard. Second Edition 1998-05-01.

Kryolitselskabet Øresund (1984) *Isukasia Hydro-power. Field Investigations*, Artic Consultant Group. Vattenbyggnadsbyrån.

Langen, P.L., R.S. Fausto, B. Vandecrux, R.H. Mottram, J.E. Box (2017) *Liquid Water Flow and Retention on the Greenland Ice Sheet in the Regional Climate Model HIRHAM5: Local and Large-scale Impacts*, Frontiers in Earth Science 4, doi: 10.3389/feart.2016.00110.

Morin, P., C. Porter, M. Cloutier, I. Howat, M.-J. Noh, M. Willis, B. Bates, C. Willamson, K. Peterman (2016) *ArcticDEM; A Publically Available, High Resolution Elevation Model of the Arctic*, EGU General Assembly Conference Abstracts, Vol. 18, 8396.

<sup>\*</sup> Delt førsteforfatterskab.

Morlighem, M., C. N. Williams, E. Rignot, L. An, J. E. Arndt, J. L. Bamber, G. Catania, N. Chauché, J. A. Dowdeswell, B. Dorschel, I. Fenty, K. Hogan, I. Howat, A. Hubbard, M. Jakobsson, T. M. Jordan, K. K. Kjeldsen, R. Millan, L. Mayer, J. Mouginot, B. P. Y. Noël, C. O'Cofaigh, S. Palmer, S. Rysgaard, H. Seroussi, M. J. Siegert, P. Slabon, F. Straneo, M. R. van den Broeke, W. Weinrebe, M. Wood, K. B. Zinglersen (2017) *BedMachine v3: Complete bed topography and ocean bathymetry mapping of Greenland from multibeam echo sounding combined with mass conservation*, Geophysical Research Letters, 44, 11,051–11,061. https://doi.org/10.1002/2017GL074954\_

Neteler, M., M. Bowman, M. Landa, M. Metz (2012) *GRASS GIS: a multi-purpose Open Source GIS*, Environmental Modelling & Software 31, 124-130, doi: 10.1016/j.envsoft.2011.11.014.

Nukissiorfiit (2005) *Grønlands vandkraftressourcer – en oversigt,* August 2005.

Teutschbein, C. and J. Seibert (2012) *Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods*, Journal of Hydrology 456-457, pp.12-29.

Yue, S., P. Pilon, G. Cavadias (2002) *Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho test for detecting monotonic trends in hydrological series*, Journal of Hydrology, Vol. 259, 254-271.