

Tom Erik Berg

# Bruk Av Driftstunnel Som Magasin For Kraftproduksjon

Masteroppgåve i Hydropower Development

Veileder: Leif Lia

Juli 2019



Tom Erik Berg

# Bruk Av Driftstunnel Som Magasin For Kraftproduksjon

Masteroppgåve i Hydropower Development  
Veileder: Leif Lia  
Juli 2019

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg- og miljøteknikk

 **NTNU**  
Norwegian University of  
Science and Technology





## MASTEROPPGÅVE

**Kandidat:** TOM ERIK BERG

**Tittel:** BRUK AV DRIFTSTUNNEL SOM MAGASIN FOR  
KRAFTPRODUKSJON

### 1 BAKGRUNN

I samband med bygging av kraftverk har magasin stor verdi for kraftproduksjonen, både med tanke på flomdemping, produksjon etter pris/inntekts-maksimering og magasinering for bruk i tørre periodar- og årstider. Små magasin nyttast i hovudsak til flomdemping og til styring av produksjon innanfor timar/døger. Etablering av magasin gjerast vanlegvis med oppdemming, senking eller kombinasjonar av dei to nemnte. I Noreg vert ofte magasin etablert der det er naturlege vatn ifrå før, men internasjonalt og mange stader nasjonal må det etablerast kunstige magasin med rein oppdemming. Dersom terrenget er bratt fører det til høge kostnader, spesielt rekna som spesifikk magasinkostnad [ $\text{kr}/\text{m}^3$ ]. I tilfelle med svært bratt terreng vil kostnaden til magasin verte så stor at den neppe kan akseptrast. I samband med slik tilfelle kjem det i ny og ne opp idear om å nytte driftstunnelen som magasin. Løysinga er (som me kjenner til) nytta ein gong i Noreg tidlegare med eit lite magasin på Fossheim kraftverk, medan Leikanger kraftverk som er under bygging i Sogn i 2019, også får ei slik løysing.

Bruk av driftstunnelen som magasin vil ha nokre utfordringar under både bygging og drift. Byggekostnaden for å etablere eit volum [ $\text{m}^3$ ] i bergrom er høgare enn det vanlegvis er for å etablere eit overflatemagasin. Derfor må det finnast gode og innovative løysingar for tunneldrift og store tverrsnitt, med både horisontale-, skrå- og vertikale tunnelar. Bruk at bekkeinntakssjakter vil også representere eit potensiale for å auke magasinvolumet. Under drift vil trykktilhøva til kraftverket oppføre seg annleis enn med eit overflatemagasin. Variasjonen i trykk (fallhøgde) vert avhengig av helling på tunnelen, tunneltverrsnitt og slukeevne, slik at kraftproduksjonen må modellerast på anna vis enn i vanlege kraftverk.

Til slutt vil det vere utfordringane med å finne optimal utforming og total lønsemd i slike løysingar med magasin i tunnel. Internasjonale variantar finnast truleg, både innanfor kraftproduksjon og andre formål for tunnelar.

## 2 HOVEDPUNKT I OPPGÅVA

Arbeidet vil ha med seg følgjande hovudpunkt:

1. Screening og litteraturstudie på bruk av tunnelar som magasin
2. Teoretisk analyse av konsept
3. Detaljert studie av aktuelle prosjekt
4. Oppsett av modell for kraftproduksjon
5. Val av parametrar for uttesting
6. Undersøking av mogelege konsept; Utforming, kostnad og produksjon
7. Rapportering.

I hovudsak skal det fokuserast på følgjande forhold:

Omfang og oppsett av oppgåva vil bli påverka av kor mykje litteratur og rapportar som finnast på slike magasinløysingar. Det kan bli aktuelt å vitje fleire av anlegga, dersom dei finnast og det er mogeleg. Det vil vere aktuelt å kople til seg kontaktar og kunnskap utanfor Noreg dersom det viser seg at slike løysingar finnast i eit omfang og med ulike utformingar utanfor landet.

Bruk av simuleringsverktøy vil avgjerast undervegs, avhengig av kor avansert det er teneleg å simulere eit system. Det kan også vise seg å vere teneleg med eigenutvikla og enkle reknemodellar, avhengig av kva som finnast ifrå før.

## 3 RETTLEIING, DATA OG INFORMASJON

Professor Leif Lia vil vere hovudrettleiar og 1.amanuensis Elena Pummer og Professor Oddbjørn Bruland vil vere medrettleiarar. Det er fleire stipendiatar som arbeider med dynamikk i vass tunnelar i forskingssenteret HydroCen, så det vil vere mogeleg å få eit samarbeid med aktive forskarar. Diskusjon med og bidrag frå kollegaer og andre medarbeidarar i NTNU, Sintef, rådg.ing.firma, NVE og kraftselskap er tilrådd. Bidrag som nyttast i rapporten skal refererast på rett måte.

## 4 RAPPORTFORMAT, REFERANSER OG ERKLÆRING

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osv. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5-format som .pdf i Inspira/DAIM og trykkast i tre eksemplar som sendast direkte frå trykkeri til faglærer/institutt. Samandraget skal ikkje gå over meir enn 450 ord og skal vere eigna for elektronisk rapportering.

Masteroppgåva skal ikkje leverast seinare enn den leveringsfristen som kjem fram gjennom DAIM/Inspira (20 veker). Oppgåva skal presenterast muntleg.

Trondheim, 11. januar 2019

---

Leif Lia  
Professor

# Samandrag

Vasskraft er ein av Norges byggesteinar og kraft trengs over heile landet. Bygging av vasskraftanlegga må prosjekterast nøye, og det vil være mange moment som må vurderast opp mot kvart enkelt tilfelle for finne den mest kostnadseffektive modellen. I dette prosjektet er hensikta å undersøkje eit mindre brukt konsept og lage ein modell for kraftproduksjon. Dette konseptet går ut på å nytte tunnelsystemet som magasin.

I Sogn byggast det for tida eit kraftverk som nyttar dette konseptet, nemleg Leikanger Kraftverk. Dette kraftverket brukast som eksempel i mine utrekningar på produksjon. Eit av dei interessante funna i oppgåva var under oppbygging av modell, der eg ser på reguleringshøgde for Pelton turbin.

Som bakgrunnsmateriale i oppgåva har eg i hovudsak nytta data frå Norges vassdrags- og energidirektorat, Nord Pool og informasjonsgrunnlag frå Sognekraft (eigar av Leikanger Kraftverk). Som metode har eg valt å bygge ein modell i Excel. Excel-modellen fungera som ein avansert vassbalansemodell der fleire forskjellige omsyn er tatt. Modellen inkludera dermed ulike moment som er relevante for utrekningane i oppgåva.

Denne Excel-modellen lar meg samanlikne produksjons- og innteningspotensialet til ulike tunnelgeometriar og det blir sett på sju alternative løysingar fordelt på tre geometriar.

# Abstract

Hydropower is one of the building blocks of Norway and power is needed all over the country. Building these hydropower facilities must be carefully planned and designed, and there will be many factors that needs to be examined in each specific project to find the best cost-effective solution. In this project, the intention is to examine a less used concept and create a model for power production. The concept is to use the tunnel system as regulated storage.

In western parts of Norway, a new power plant is being built using this concept; Leikanger Hydropower Plant. This power plant is also used as basis for my calculations on production. One of the interesting finds in this thesis was when building the model, where the regulating height of a Pelton turbine was examined.

As background-material in my thesis I have mainly used data from The Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Nord Pool and information given by Sognekraft (owner of Leikanger Project). As for my method, I chose to build a model in Excel. This Excel-model works as an advanced water balance model where several considerations has been made. The model therefore includes different factors that is relevant for production calculations.

The Excel-model allows me to compare production and income potential for different tunnel geometries and I have looked into seven different alternatives distributed between three geometries.



# Forord

Denne avhandlinga er det avsluttande arbeidet ved det toårige internasjonale masterprogrammet *Hydropower Development* ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgåva handlar om konseptet tunnelmagasin og tek for seg produksjonsberekningar for eit av prosjekta.

Ein stor takk rettast til min hovudrettleiar, Leif Lia. Leif har gjeve uvurderleg rettleiing, vært ein god diskusjonspartner og har delt mykje kunnskap med meg. Eg takkar for alle råd eg har fått gjennom semesteret og for alt eg har fått lære av deg.

Det rettes også ein takk til:

- Erlend Hillestad Bårgard (hjá Sognekraft) for informasjon til oppgåva og svar på forskjellige spørsmål om prosjektet deira.
- Wolfgang Richter (TU Graz) & Kaspar Vereide (NTNU/Sira-Kvina) for organisering av seminar i Østerrike og hjelp med litteratur.
- Mine medrettleiarar, Elena Pummer & Oddbjørn Bruland, for svar på spørsmål innan deira fagfelt.
- Mine klassevener og familie for støtte gjennom semesteret.



Tom Erik Berg

Trondheim, 2019



# Innhald

Figurar .....	xiii
Tabellar .....	xiii
1 Introduksjon .....	15
1.1 Generelt om tunnelmagasin.....	16
1.1.1 Størrelse og utforming på magasin.....	16
1.1.2 Problemstillingar ved tunnelmagasin.....	17
1.1.3 Geologiske forhold til vurdering .....	18
1.2 Typiske operasjonsstrategiar .....	18
1.2.1 Effektkjøring .....	19
1.2.2 Start/stopp køyring .....	19
1.3 Kraftverk som nyttar konseptet med tunnelmagasin. ....	19
1.3.1 Fossheim Kraftverk.....	19
1.3.2 Stanzertal .....	20
1.3.3 Leikanger Kraftverk .....	20
1.4 Simuleringsverky.....	22
2 Metode og Material.....	24
2.1 Klargjering av data .....	24
2.1.1 Hydrologiske data .....	24
2.1.2 Verknadsgrader .....	31
2.1.3 Elektrisitetspriser .....	34
2.2 Korleis modellen fungerer .....	35
2.3 Oppbygging av modell.....	38
2.3.1 Sortering av tilsig.....	39
2.3.2 Sortering av pris .....	39
2.3.3 Køyring av kraftverk (vassbalanse).....	39
2.3.4 Definerings av fallhøgde.....	40
2.3.5 Falltap.....	41
2.3.6 Effektiv (høgde) verknadsgrad for turbin .....	41
2.4 Dei ulike simuleringane .....	43
2.4.1 Alternativ 1. Utan regulering .....	43
2.4.2 Alternativ 2. Dagens løysing.....	44
2.4.3 Alternativ 3. Dagens løysing med auka reguleringsnivå .....	44
2.4.4 Alternativ 4. Bergrom (vertikal sjakt).....	44
2.4.5 Alternativ 5. Bergrom (vertikal sjakt) med auka reguleringsnivå .....	45
2.4.6 Alternativ 6. Skråtunnel.....	45

2.4.7	Alternativ 7. Skråtunnel med auka reguleringsnivå.....	45
2.5	Kostnadar .....	46
3	Resultat .....	47
4	Diskusjon .....	50
	Bibliografi .....	51
	Vedlegg.....	54

# Figurar

Figur 1: Forenkla illustrasjon og namnsetting av tunnelsystem .....	15
Figur 2: Knølrensk (NTH, 1995) .....	18
Figur 3: Leikanger Kraftverk illustrasjon av dagens løysing .....	20
Figur 4: Vassdragsområde til Leikanger Kraftverk (NVE, 2019) .....	21
Figur 5: Syner kraftstasjon og inntak med nedbørsfelt. ....	24
Figur 6: Syner målestasjonar i nærleiken av Leikanger Kraftverk (NVE, 2019) .....	27
Figur 7: Vassføringsdata for aktuelle målestasjonar, før skalering. Data frå senorge.no (NVE, 2019) .....	28
Figur 8: Vassføringsdata (sum av alle inntak) etter skalering .....	29
Figur 9: Turbintypar Kaplan (raudt), Francis (gult) og Pelton (grøn) (ANDRITZ HYDRO GmbH, 2018). Blå runding er Leikanger Kraftverk. ....	31
Figur 10: Verknadsgradskurve for store turbinar frå NVE sitt kostnadsgrunnlag (Stensby, 2016).....	32
Figur 11: Verknadsgrader brukt til å lage ny kurve, (a) Samanliknar forskjellige turbinar (Quaschnig, 2015), (b) kurve for mindre Pelton turbinar (Kahfi, 2010), (c) 1 og 2 strålar Pelton av nyare dato (First, 2015), (d) Forskjellige turbinar til samanlikning (Jain & Patel, 2013). ....	33
Figur 12: Verknadsgradskurve for Pelton med funksjon av relativt tilsig ( $Q/Q_{maks}$ ) .....	33
Figur 13: Utsnitt frå NVE Atlas, prisområde og kraftverk (NVE, 2019) .....	34
Figur 14: Gjennomsnittleg timespris for perioden 2013-2018 (Nord Pool ASA, 2015-2018) .....	35
Figur 15: Prisdifferanse mellom døgn .....	37
Figur 16: Magasinkurve for dagens løysing .....	40
Figur 17: Verknadsgradskurve som funksjon av fallhøgde.....	42
Figur 18: Illustrasjon av alternativet «Dagens løysing» .....	44
Figur 19: Illustrasjon av alternativet «Bergrom (vertikal sjakt)» .....	44
Figur 20: Illustrasjon av alternativet «Skråttunnel» .....	45
Figur 21: Inntening i NOK pr GWh.....	47

# Tabellar

Tabell 1: Karakteristikk til inntaka og målestasjonar (NVE, 2019) .....	25
Tabell 2: Skaleringsfaktor for inntak, skalert frå Sogndalsvatn .....	27
Tabell 3: Skaleringsfaktor for inntak, skalert frå Nessedalselv .....	28
Tabell 4: Utvida karakteristikk for nedbørsfelte (NVE, 2019) .....	29
Tabell 5: Minstevassføringar i prosjektet (Sognekraft, 2009) .....	30
Tabell 6: Pris for tre tilfeldig valte dagar med betinga formatering (mørkare grøn = høgare pris), enhet: øre/kWh .....	36
Tabell 7: Oppbygging av modell i rekneark .....	38
Tabell 8: Oversikt av produksjon og inntening i årsverdiar for alternativa .....	47
Tabell 9: Tre alternativ som skiller seg ut .....	48
Tabell 10: Aktuelle alternativ og sjå vidare på. ....	48
Tabell 11: Kostnadar for alternativa.....	48
Tabell 12: Inntektstal for samanlikning .....	48

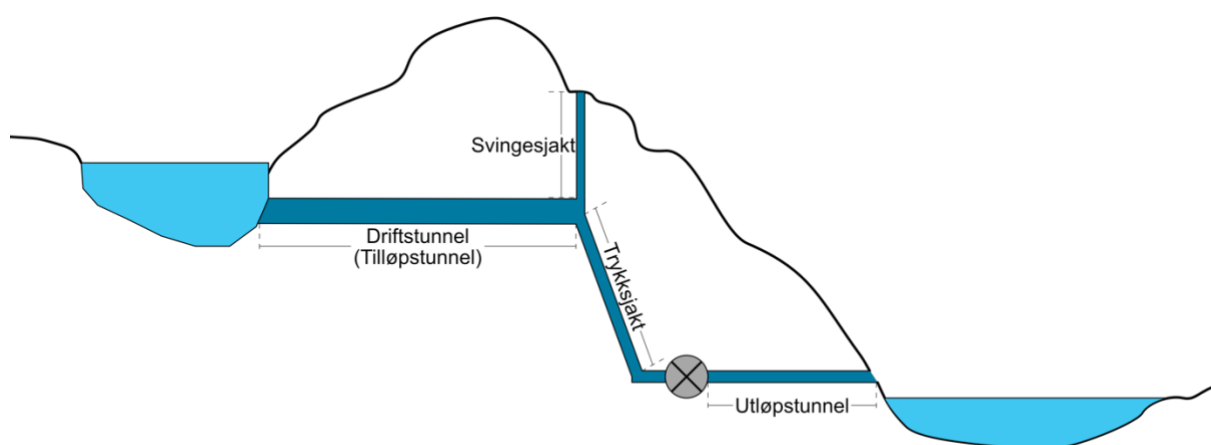


# 1 Introduksjon

Vasskraftpotensiale for større kraftverk i Norge er godt utbygd. Krav og miljøomsyn blir stadig strengare og mange vassdrag er verna mot utbygging. Bevisstheita om miljø har også auka med tida. Eigna tilgjengeleg overflateareal for å etablere magasin er ein knapp ressurs. Fjellrike land som Norge kan gjere etablering av nye magasin vanskelig grunna topografien og miljøomsyna. Ofte etablerast magasin ved oppdemming av eksisterande innsjøar, men det finst også tilfelle der heile magasinkonstruksjonen er kunstig bygd.

Generelt så ønskjer ofte eigar av kraftverk å byggje damkonstruksjonen så høgt som det let seg gjere med omsyn på marginalkostnaden, steget der fordelane ikkje lenger rettferdiggjir kostnadane. Fordelane med magasin er mange og godt dokumenterte. Eit magasin vil gje høve til å lagre vatn for seinare produksjon (batteri) og fleksibiliteten det medfører, men førar også med seg ulempe knytt til mellom anna naturliv, jordbruk og busetnad.

Medan store magasin nyttast til lagring av vatn for produksjon i tørre årstider (vinter), nyttast mindre magasin ofte til flaumdemping og for å dekkje lasttoppar. Elvekraftverk operera utan (nemneverdig) regulering og klarar som regel ikkje møte desse lasttoppane i forbruket. I bratt og ulendt terreng vil kostnaden for etablering av magasin (magasinkostnad) verte såpass høg at det truleg ikkje vil la seg realisere. Ideen om å nytte tunnelsystemet som magasin dukkar til tider opp når det er høg etableringskostnad for konvensjonelt (overflate) magasin. I hovudsak er det driftstunnelen, også kalla tilløpstunnelen, som nyttast for aktiv regulering i tunnelsystemet. Figur 1 syner enkel illustrasjon av tunnelsystem.



**Figur 1: Forenkla illustrasjon og namnsetting av tunnelsystem**

Bruk av tunnelsystemet som magasin er ikkje eit nytt konsept, men det er ei mindre nytta løysing. Normalt sett er det dyrare å etablere det same volumet som eit overflatemagasin har i ein tunnel. Genialiteten med konseptet om tunnelmagasin er at oftast må tunnel uansett konstruerast og dermed er mykje av kostnaden allereie tatt. Viss det også er betydeleg avstand frå eit eller fleire inntak, så vil det spele positivt inn på volumet.

Bruk av kraftverk i berg kan også sjåast på som eit miljøvenleg alternativ til kraftverk i dagen. Eksempelvis vil fem småkraftverk vil ha større naturinngrep enn eit større (underjordisk) kraftverk med «takrennesystem» til fem inntak. Eit takrennesystem er når vatn frå fleire inntak renn ned til ei felles samlere. Eksempel på eit takrennesystem er illustrert i Figur 3.

*Denne oppgåva er i hovudsak todelt. Først skal konseptet analyserast og aktuelle prosjekt bli presenterte, deretter lage ein modell for produksjonsberekningar for å sjå på ulike geometriske alternativ. Denne modellen for produksjonsberekningar er ein rein prismodell for tunnelmagasin og ser dermed berre på maksimering av inntekt.*

## 1.1 Generelt om tunnelmagasin som konsept

Korleis tunnelen skal brukast (operasjonsstrategi) og tunnelen si utforming er i hovudsak det konseptet går ut på. Tunnelutforminga, eller tunnelgeometrien, vil alltid verte bestemt av lokale forhold og anleggsdrift på det aktuelle prosjektet. Kor stor tunnelen skal være tilpassa dei lokale forhold er hovudsakleg ei eiga optimaliseringsoppgåve som gjerast kvart prosjekt, men generelt sett blir ofte tverrsnittet større enn det som var planlagt i tidleg fase av prosjektet.

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har sidan 1982, med ny utgåve kvart 5. år, publisert rapporten «Kostnadsgrunnlag for vannkraft». Den siste utgåva av rapporten med kostnadsnivå opptil januar 2015 (Stensby, 2016) har ei god forklaring på kvifor tverrsnittet ofte blir større enn tenkt:

«Anbudsdokumentene ber om pris på f.eks. en 20 m<sup>2</sup> tunnel, mens entreprenøren gir en så gunstig pris for en 25 m<sup>2</sup> tunnel at kontrakten blir basert på 25 m<sup>2</sup> tunneltverrsnitt. Byggherren kan imidlertid få andre omkostninger hvis han gjør denne avtalen, f.eks. større sikringsomfang, økte tipparealutgifter etc.»

Større tverrsnitt, saman med lengda på tunnelen, vil gje større volum og dette har sine fordelar som utgjer ein viktig del av konseptet. Mengde vatn som kan lagrast i tunnelen vil påverke på kor mykje produksjonen kan tilpassast etter pris og strategi. Det kan være tenleg å auke tverrsnittet på tunnelen for å få ekstra volum, men dette er som nemnt ei eiga optimeringsoppgåve som må utførast for kvart prosjekt der ein vurderer tunnelmagasin.

### 1.1.1 Størrelse og utforming på magasin

Ulikt frå overflatemagasin, der éin m<sup>3</sup> med luft vert erstatta med vatn, vil kvar m<sup>3</sup> med tunnelvolum gje same mengde med steinmasser. Denne massen må gjerast noko med og vert som regel brukt i forskjellige utbyggingsprosjekt (eksempelvis veg) eller deponeras som land- eller sjøfylling.

I forhold til overflatemagasin vil tunnelmagasin gjerne ha eit avgrensa volum. Det avgrensa volumet betyr at tunnelmagasinet vil være eit mindre magasin, altså korttidsmagasin. Her gjeld det å finne ein balanse mellom pris, ønskt volum og kor mykje steinmasser ein kan ta hand om.



### 1.1.2 Problemstillingar ved tunnelmagasin

Det finst mange innovative løysingar på vasskraftsprosjekt. I Europa forskast det på pumpekraftverk med underjordiske magasin, der mellom anna luftfiltrering er eit viktig tema. Magnus Hoffmann (2018) såg i si masteroppgåve på dempeeigenskapar for forskjellige geometriske løysingar til underjordisk pumpekraftverk, deriblant ringforma og fleirkanals utforming, samt bruk av gamle gruver. Han finn at alle (teoretisk) undersøkte geometriske utformingar viser underdempa oppførsel for 2. ordens system. I underdempa system vil første amplitude (svinging) etter forandring (eksempelvis pådrag) være den største.

Hoffman trekker fram nokre viktige punkt i avhandlinga si. Det er gjort ei betydeleg større mengde forskning på tradisjonelle pumpesystem og dette må tilpassast til underjordisk pumpesystem slik at usikkerheit rundt utforming kan eliminerast. Viss systemet oppnår gode dempeeigenskapar vil bølgyrefleksjonar minske som igjen gjev moglegheit for raskare endring av pådrag. Med låg nok vasshastigheit vil også skjærspenninga reduserast, dermed unngå potensiell skade i form av deformasjon av tunnelvegg o.l.

Richter, Knoblauch og Zenz (2016) belyser viktige problemstillingar i ein artikkel om utforming til svingekammer for tunnelmagasin. Her ser dei på situasjonen ved å gå frå trykksatt til frispelstrømming og tilbake, og tek for seg tre viktige situasjonar som kan oppstå:

1. Oppførselen til luftbobler og oppsamla luft
2. Refleksjon av vasshammar
3. Kolonneseparasjon  
(Kolonneseparasjon er eit fenomen der vassstrengen delar seg grunna luftbobler som oppstår dersom trykket i rør eller tunnel fell under damptrykket til vatnet og dermed fordampar (kavitasjon))

I same artikkel har Richter, Knoblauch og Zenz også trekt nokre føresetnadar for å unngå situasjonane nemnt over:

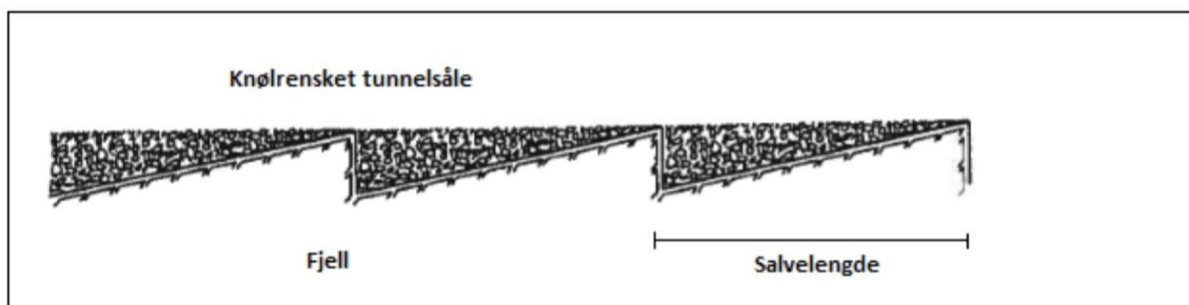
- Det burde installerast ei form for utluftingsanordning for å unngå at luft blåsast ut ved inntak og for å unngå at lufta transporterast mot turbin.
- Slitasje og skade på utstyr kan unngåast med riktig beskyttelse mot luftbobler og luftvirvlar. Hydraulisk sprang er eit eksempel på situasjon som kan skape luftboble.
- Eit riktig dimensjonert svingekammer vil gjere til at problema kan unngåast. Forskjellig utforma svingekammer er også presentert, der mellom anna ei utviding av arealet før trykksjakta og todelt svingekammer med struping vil hjelpe på systemets handtering av forskjellige trykkehøve som oppstår ved rask endring i pådrag.

### 1.1.3 Geologiske forhold til vurdering

Generelt er det også problemstillinger knytt til «klassisk» geologi. I eit magasin så vil vassnivået gå mellom lågaste regulerte vasstand (LRV) til høgaste regulerte vasstand (HRV). Når heving og senking av vassnivået skjer i ein tunnel vil det være fare for erosjon av vegg, golv og tak. Erosjon vil føre til at mindre partiklar av sand (sedimentasjon) vil følgje vatnets retning (mot turbin).

Slike sandpartiklar er uheldig for turbin då partiklane sliper ned eggen (delen av skovla som først blir treft av vasstrålen) på løpehjulet. For å unngå dette kan det byggjast eit sandfang. Dette sandfanget vil fordelaktig plasserast i nær avstand til trykksjakta for å fange mest mogleg av sedimentasjonen. Det er også viktig at vasshastigheita ikkje er for høg, då høg fart på vatnet vil dra med seg sand lagra i sandfanget. Ved låg fart vil sandpartiklane få tid til å søkkje til botn i sandfang og bli der. Reinsing av sandfang kan også være problematisk utan lengre stopp i produksjon som er kostbart (tømme tunnel og fysisk fjerning av sand, mistar moglegheit til å produsere på same tid).

Under driving av tunnel treng utstyr flatt underlag for å køyre massar og utstyr fram og tilbake i tunnel. Etter tunnel er ferdigstilt vil det være eit spørsmål om kva som skal gjerast med underlaget (som er fylt med sand/grus, eller rettare sagt; kor nøye skal det reinskast? For kraftproduksjon vil det beste være å reinske mest mogleg, men dette er ikkje nødvendigvis det beste anleggsmessig. Det er også tidkrevjande og dyrt å utføre full reinsk av såle. Figur 2 illustrera ei mogleg løysing der sålen blir reinska ned til knøl. Denne løysinga tillatar seinare inspeksjon (kan køyre på underlaget) og har ei jamnare overflate som spelar inn på falltap, men har også ei auka fare for sedimentering.



**Figur 2: Knørenska (NTH, 1995)**

Svakheitssoner, eksempelvis svelleleire, vil være ein viktig faktor i konseptet også. Ved heving og senking av vassnivået forandrar ein dei fysiske eigenskapane som originalt hadde vært der tunnelen er bygd. Svelleleire utvidar seg når den kjem i kontakt med vatn og kan i verste fall føre til ras i ei svakheitssone (Nilsen, 2016). Alt i alt vil dei geologiske forholda vil ha ein stor påverknad på pris avhengig av kva løysing som blir valt i dei forskjellige vurderingane.

## 1.2 Typiske operasjonsstrategiar

Eit tunnelmagasin vil i mange høve ha lik operasjonsstrategi som eit kraftverk med korttidsmagasin har. Med eit lite magasin kan produksjon forskyvast innan døger, basert på prisprognosar, til dei timane prisane er høge. I verkelegheita tilpassast dette også etter behovet for flaumdemping. Det er viktig at magasinet ikkje er fullt før det kjem kraftig nedbør, slik at dette vatnet faktisk kan «fangast».

Avhengig av kva eigar av kraftverk ønskjer eller treng så forklarast to generelle strategiar her. I tillegg til desse strategiane vil kraftverk operere «normalt» når det er nok og jamn tilsig, samt det ikkje er store svingingar i nettet. Kapittel 2.2 viser kvifor korttidsoptimalisering er viktig.

### 1.2.1 Effektkjøring

CEDREN har ein god definisjon på effektkjøring frå ein presentasjon (Bakken, u.d.)

«Effektkjøring er variabel drift for å møte behov for stabilisering av nett eller kortsiktige variasjoner i etterspørsel i kraftmarkedet»

Effektkjøring er altså å tilpasse aggregatet til å møte svingingar eller lasttoppar i nettet, men det kan også medføre miljømessige ulemper. Med effektkjøring vil det nedstrøms av kraftverk være hyppige endringar i vasstand og vassføring, noko som kan ha større konsekvensar for økosystem og marint liv dersom kraftverket har utløp i elv.

### 1.2.2 Start/stopp kjøring

Start/stopp kjøring, også kalla «skvalpekjøring», er når tilsiget eller tilgjengeleg vatn er mindre enn slukeemna til turbinen og kraftverket startar og stoppar i tider for å produsere ved ein gunstig timespris. Altså, når det er (omtrent) tomt for vatn i magasinet, stoppar turbinen, samlar opp vatn og startar turbinen når straumprisen er gunstig. Etter dette søkk nivået gjerne igjen til magasinet er tomt og gjentek.

Når det er nok tilsig inn (altså (godt) innafor eller større enn slukeemna) så treng ikkje kraftverket å operere med start/stopp kjøring. Start/stopp kjøring vil også ha noko av dei same miljøomsyna som effektkjøring har med tanke på utløpet frå kraftverk. Mekanisk utrustning må også tilpassast til start/stopp operasjonar (grunna meir slitasje av variabel drift).

## 1.3 Kraftverk som nyttar konseptet med tunnelmagasin.

Dette kapittelet presentera aktuelle prosjekt/kraftverk som nyttar konseptet med tunnelmagasin. Frå litteratursøk dukka tre kraftverk opp, men det er mogleg det finst fleire kraftverk med denne løysinga.

### 1.3.1 Fossheim Kraftverk

Fossheim Kraftverk er eit konvensjonelt, lite vasskraftverk. Kraftverket nyttar tilløpstunnel frå inntak som magasin. Tilløpstunnelen fungera her som ei forlenging av inntaket inn i fjell. Vatn frå eit par mindre bekkar er også overført til inntaksdammen før tunneldel. Tilløpstunnelen har eit tverrsnitt på mellom 22-28 m<sup>2</sup> og er horisontal med ei lengde på 200 m før den når trykksjakta. Eigar av kraftverket, Sunnfjord Energi, køyrer kraftverket på vasstandregulering etter damterskel og justera etter tilsiget.

Ved lågt tilsig (slik at vassnivå i dammen søkk), så leggast turbin i effektkjøring til magasinet (inntaksdam og tilløpstunne) er tomt og dei stoppar kraftverket til magasinet er fylt opp igjen. Sidan tunnelen er såpass liten (omtrent 30 minutt med full produksjon i tilløpstunnel) blir ikkje dette kraftverket brukt vidare i oppgåva.

### 1.3.2 Stanzertal

*Kraftwerk Stanzertal* i Østerrike er eit unikt prosjekt med tanke på involverte partar (Widmann & Roner, 2013). Prosjektet viser at ved å involvere innbyggjarar og lokale grunneigarar (generelt lokalsamfunnet) i heile prosessen, frå start til slutt, så er haldninga snudd frå «NIMBY» («not in my backyard») til «YIMBY» («yes in my backyard»).

Stanzertal nyttar også driftstunnelen som magasin. Tilsiget tilgjengeleg for dette kraftverket er lågare enn slukeemna 300 dagar i året som gjer til at kraftverket kan tenkast å fungere reint til utjamning av lasttoppar i nettet og dermed oppnå stabilitet i nettet.

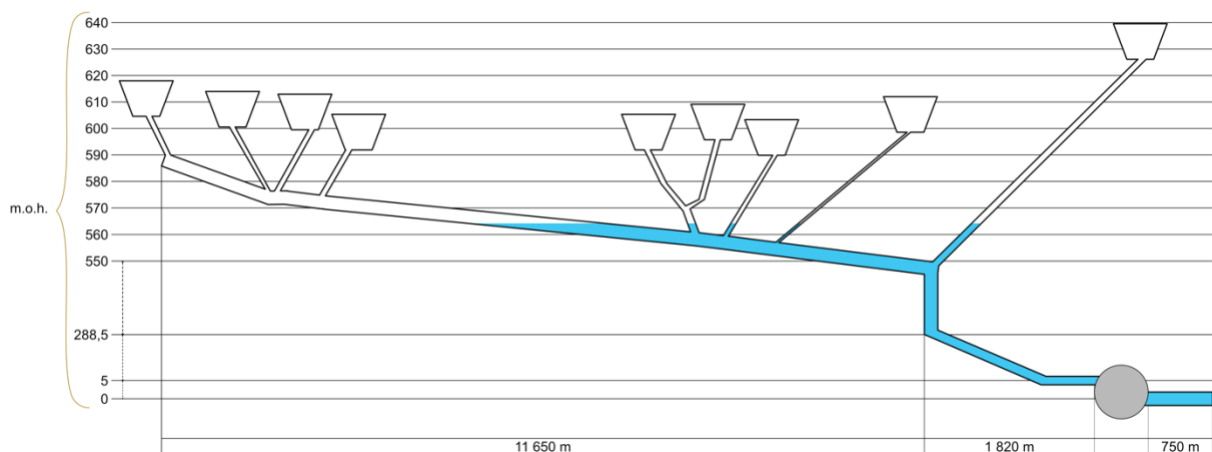
### 1.3.3 Leikanger Kraftverk

Leikanger Kraftverk er under bygging i Sogn og skal etter planen være i drift innan utgangen av 2021. Kraftverket er tenkt å ha installert effekt på 77 MW frå ein Pelton turbin med slukeemne på 14,6 m<sup>3</sup>/s. Planlagt årsproduksjon (frå planleggingsfase) er berekna å være 208 GWh.

Pelton turbinen kan grunnjevast med omsyn på følgjande:

- Stor fallhøgde (ca. 595 m brutto frå kraftstasjon til lågaste inntak)
- Avgrensa tilgang på vatn (varierende mengde gjennom år)
- Ønske om breitt operasjonsområde (Pelton gjev ca. 5-100 % av slukeemna)

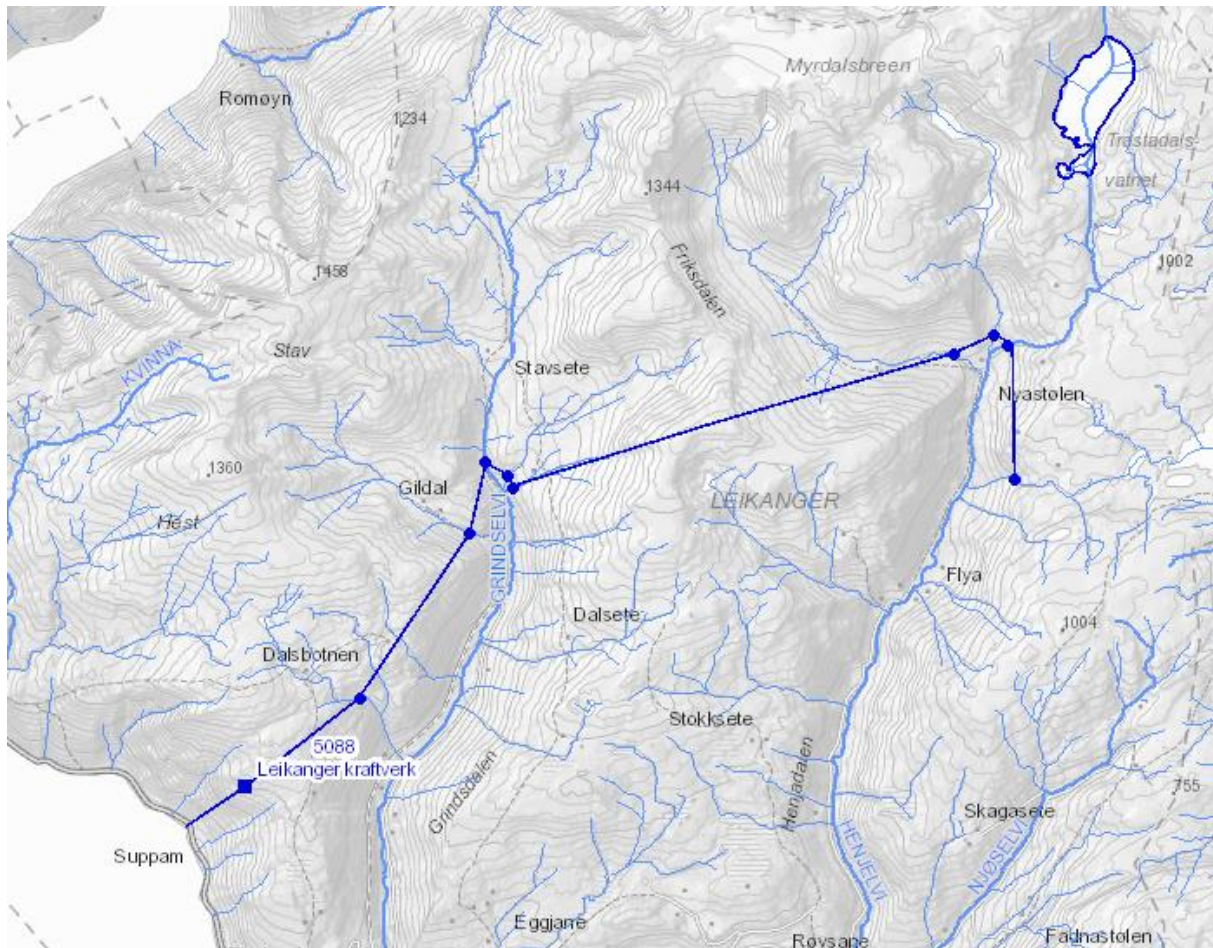
Leikanger Kraftverk er eit ypparleg eksempel på takrennesystem. Ni inntak spreidd utover og kopla saman av ein tunnel på nesten 12 km og er illustrert i Figur 3. For å frakte vatn frå inntaket lengst vekk, trengs det fall på tunnelen. Dette fallet er haldt lågast mogleg for å miste minst mogleg fallhøge. Trykksjakta byrjar på kote 545.



**Figur 3: Leikanger Kraftverk illustrasjon av dagens løysing**

Tunnelsystemet til Leikanger Kraftverk møter på soner med svelleleire. Svelleleire, som beskrive tidlegare, kan by på problem for sikkerheit både under bygging og under drift. For å unngå eventuelle problem som kjem av vekselvis tørrlegging og blautlegging av tunnelveggar har Sognekraft valt å halde delen med svelleleire blautlagt. Dette fører til at LRV ikkje lenger er ved trykksjakt, men høgare oppe i tunnelsystemet. På Figur 3 er blå del vatn i tunnel vist som ny LRV på kote 565.

Leikanger Kraftverk har utløp rett i sjø og dermed er konsekvensar (for miljø) angående skvalpekjøring og effektkjøring er dermed omtrent ikkje tilstade. Det som vil bli påverka er elveløpet der inntaka er plasserte. Figur 4 syner plassering av inntak over to ulike elveløp, der fem inntak er plassert i bekkar til Grindselvi og fire inntak i bekkar til Henjaelvi. Frå konsesjonssøknaden er det krav om minstevassføring frå utvalte inntak i begge elvelaup (Sognekraft, 2009).



**Figur 4: Vassdragsområde til Leikanger Kraftverk (NVE, 2019)**

Vidare i oppgåva vil Leikanger Kraftverk bli brukt som eksempel og bakgrunn for produksjonsberekningane. Meir informasjon om kraftverket blir derfor presentert forskjellige stadar i seinare kapittel.

## 1.4 Simuleringsverktøy

Det finst fleire simuleringsverktøy i dag som kan gjere produksjonsberekningar. Sintef, eit av Europas største uavhengige forskingsinstitutt, har utvikla ei rekkje av verktøya som er tilgjengeleg. Dette kapitlet har til hensikt å kort belyse dei ulike verktøya sine arbeidsområde. Oppbygging i valt verktøy kjem i kapittel 2.

### **SHOP**

Kortsiktig planlegging (ei til fem veke(r) fram i tid).

Fokuserar på optimal bruk av ressursar og berekna detaljerte produksjonsplanar under ulike føresetnadar om tilsig, straumprisar og belastning. Nyttar suksessiv lineær programmering (Sintef, u.d.).

### **SHARM**

Kortsiktig planlegging.

Nytta same programmering som SHOP, men tek også omsyn til uvisse rundt hydrologiske data og prisar i spottmarknaden (Sintef, u.d.).

### **Samkjøringsmodellen**

Langsiktig planlegging.

Nyttast ofte i investeringsanalyser og prognosering av spottprisar (Sintef, 2014).

### **Vansimtap**

Langsiktig planlegging (sesongbasert).

Nyttar fleirscenarior deterministisk optimering for berekning av vassverdiar som deretter simulerast med ein detaljert tappefordelingsmodell (Sintef, u.d.).

### **ProdRisk**

Langsiktig planlegging (tre til ti år).

Godt egna for kompliserte vassdrag i kaskade/serie. Basert på statistisk dobbeldynamisk programmering og utførar i hovudsak same planlegging som Vansimtap (Sintef, u.d.).

### **POM (Powel Optimal Midterm)**

Kortsiktig planlegging.

Målet er å lage ein strategi for korleis vatnet skal brukast for høgst mogleg inntening basert på lineær-stokastisk optimalisering (Powel, u.d.).

## **(E)nMag**

Langsiktig planlegging.

Program for magasinoptimering, produksjon og økonomisk fortjeneste (Killingtveit & Sælthun, 1995).

## **Excel (eigenprodusert modell)**

Ein Excel-modell kan, og vil, i mange tilfelle vere like tenleg for produksjonsberekning som avanserte verkty. Fordelen med eigenprodusert modell er at alle funksjonar, korleis funksjonane fungera og kva som ligg bak funksjonane, er kjente.

På bakgrunn av at Leikanger Kraftverk har eit magasin som held tre til fire timar med produksjon og eit relativt avansert tunnelsystem. Fleire av dei ovannemnte verktya kunne ha vore tilpassa til Leikanger Kraftverk, med det rådde ei uvisse om kor langt verktya kunne tilpassast og kor nøyaktige verktya ville blitt når det opererast med timesoppløysing. (E)nMag var tenkt å bruke, med vart uaktuell sidan den ikkje operera med timesoppløysing.

Ei full forståing for korleis funksjonane jobbar og verkemåte var ønskeleg og dermed vart Excel og eigenprodusert modell valt. Kapittel 2 forklarar den aktuelle løysinga brukt i Excel-modellen.

## 2 Metode og Material

I eit kommersielt driftsopplegg vil det brukast pris- og nedbørsprognoser til å kontinuerlig simulere drift framover. Kraftselskapa planlegg produksjonen i detalj eit døgn fram i tid. Den simuleringa som skal til for å prognosere fleire samanhengande døgn er ikkje mogleg å få til utan relativt avansert programvare som nemnt i kapittel 1.4.

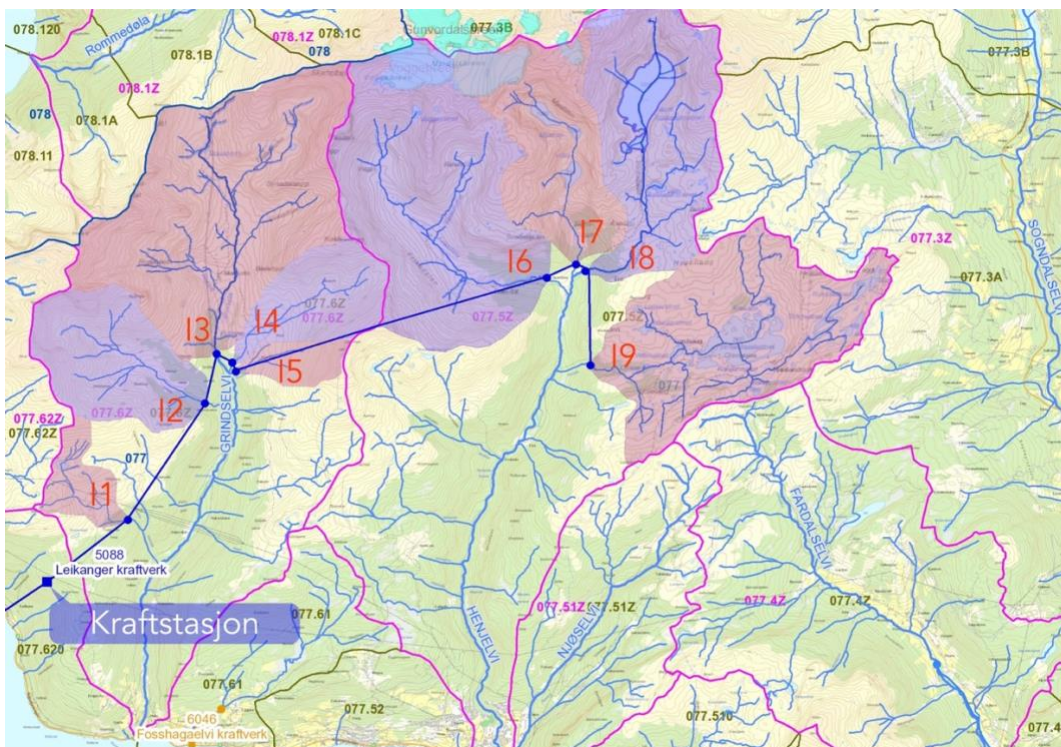
For å løyse oppgåva er det valt å gjere ei forenkling i modell forklart i 2.2. Målet med modellen er å få resultat frå fleire alternativ og samanlikne resultatata ved dei ulike løysingane. Det er ganske vanskelig og komplisert å forskyve produksjon mellom døgn basert på strategi.

### 2.1 Klargjering av data

I dette delkapittelet forklarar kva som måtte gjerast med data før dei vart satt inn i modell. Oppsett av modell, behandling av data i modell og val av parameter for uttesting kjem i seinare delkapittel.

#### 2.1.1 Hydrologiske data

Leikanger Kraftverk har ni inntak fordelt på to elveløp; Grindselvi og Henjaelvi. Kvart av dei ni inntaka har sitt eige nedbørsfelt vist i Figur 5. I 2007 installerte Sognekraft målestasjonar, av type limnigraf, ved Grindselvi og Henjaelvi. Data frå målestasjonane i Grindselvi og Henjaelvi blir henta inn av NVE, men er ikkje ope/offentleg tilgjengeleg for privatpersonar.



Figur 5: Syner kraftstasjon og inntak med nedbørsfelt.



Sidan data frå målestasjonane i Grindselvi og Henjaelvi ikkje er offentleg tilgjengeleg, falt valet på å finne ein målestasjon i nærleiken. NVE har ein offentleg målestasjon, Sogndalsvatn, som ligg direkte i nærleik av delnedbørsfeltet til inntaka. Målestasjonen Sogndalsvatn med sitt nedslagsfelt på 112,1 km<sup>2</sup> er betydelig større enn inntaka sine felt på 1,2 km<sup>2</sup> til 14,1 km<sup>2</sup> og karakteristikken kan sjåast i Tabell 1 under. All data for inntak og målestasjonar er henta frå NVE Nevina og kan sjåast i vedlegg 1.

**Tabell 1: Karakteristikk til inntaka og målestasjonar (NVE, 2019)**

	<b>Areal, [A] km<sup>2</sup></b>	<b>Spesifikk Avrenning [F] l/s*km<sup>2</sup></b>	<b>Tilsig [Q = A*F] m<sup>3</sup>/s</b>
<b>Skitstøla</b>	1,6	55,4	0,089
<b>Gildøla</b>	5,3	63,7	0,338
<b>Stavseta</b>	14,1	79,8	1,125
<b>Pyttane</b>	3,3	77,0	0,254
<b>Nyastøla</b>	1,2	69,8	0,084
<b>Friksdøla</b>	13,3	80,4	1,069
<b>SleTTabotn</b>	6,6	85,0	0,561
<b>Traståna</b>	8,6	76,6	0,659
<b>Reisetåi</b>	11,0	49,2	0,541
<b>Sum inntak</b>	65	70,8	4,602
<b>Sogndalsvatn</b>	112,1	77,7	8,710

Ved å sjå på karakteristikken til nedslagsfeltet i Tabell 1 over kan følgjande likningar for skalering av nedbørsfelt utledast:

$$Q = A * F \quad (1)$$

$$\frac{Q}{A * F} \quad (2)$$

$$\frac{Q_1}{A_1 * F_1} = \frac{Q_2}{A_2 * F_2} \quad (3)$$

$$Q_2 = Q_1 * \frac{A_2 * F_2}{A_1 * F_1} \quad (4)$$

der  $Q$  er tilsiget i m<sup>3</sup>/s,  $A$  er arealet i km<sup>2</sup> og  $F$  er spesifikk avrenning i l/s\*km<sup>2</sup>. Formel (4) kan kallast skaleringsformel eller skaleringsmetode og forholdet mellom areal og spesifikk avrenning blir kalla skaleringsfaktoren. Den optimale skaleringsfaktoren er lik 1 (m.a.o. tilsig inn er lik tilsig ut av formelen og felte vil sannsynlegvis være like).

Skalering er ein metode for å tilpasse dataserien frå eit nedbørsfelt (målestasjon) til å passe eit anna nedbørsfelt utan dataserie, f.eks. inntaka. Ved skalering skal det takast høgde for forskjellar mellom felta. Frå Tveit (1994) si bok om Ingeniørhydrologi er det viktig å vurdere følgjande kriterier ved skalering av nedbørsfelt til nedbørsfelt:

### **Areal**

Arealet til nedslagsfeltet spelar inn på oppførselen til feltet. Eit lite felt vil gje «skarpere» oppførsel, altså raskare avrenning, medan eit større felt vil ha ein meir redusert skarphet i form av jamnare tilsig.

### **Spesifikk avrenning**

Spesifikk avrenning fortel korleis avrenninga i feltet er. Store forskjellar i avrenning kan gje eit dårlegare inntrykk av korleis avrenninga blir generert i feltet og dermed eit unøyaktig resultat.

### **Høgdeforskjell**

Høgdeforskjell påverkar snølagring, snøsmelting og nedbørsvariasjonen i feltet. Bre vil også gje demping (lagrar vatn lengre).

### **Vêrtype** (Eller vêrmønster)

Dersom det er store avstandar mellom samanlikningsfelta er det fare for at vêrmønsteret har forandra seg. Det er ulikt vêr på kysten enn det som er ved innlandet.

### **Overflate (type)**

Vegetasjon og lausmasser. Utbyggingsgrad. Dette vil påverke kor raskt tilsiget renn gjennom feltet. Innsjøar/vatn vil også gjeve ei demping i hydrograf, grad av demping avhenger av sjøprosenten (prosentdel av sjø/vatn i nedbørsfeltet).

### **Nedbørsfeltets form**

Lengde, breidde og helling i felta vil spele inn på distribuering av tilsig til felta.

Med informasjon om skaleringsfaktor og skaleringskriterier kan skaleringsformelen over tilpassast til Sogndalsvatn Målestasjon,

$$Q_{inntak} = Q_{målestasjon} * \frac{A_{inntak} * F_{inntak}}{A_{målestasjon} * F_{målestasjon}} \quad (5)$$

og inntaka får skaleringsfaktorar vist i Tabell 2.

**Tabell 2: Skaleringsfaktor for inntak, skalert frå Sogndalsvatn**

Inntak	Skaleringsfaktor
<b>Skitstøla</b>	0,010
<b>Gildøla</b>	0,039
<b>Stavseta</b>	0,129
<b>Pyttane</b>	0,029
<b>Nyastøla</b>	0,010
<b>Friksdøla</b>	0,123
<b>Slettabotn</b>	0,064
<b>Traståna</b>	0,076
<b>Reisetåi</b>	0,062

Tidlegare var det nemnt at den optimale skaleringsfaktoren er lik 1. Frå skaleringa er skaleringsfaktoren langt frå 1 og dette er urovekkande. Nye undersøkingar vart gjort for å finne andre målestasjonar. Figur 6 under syner plassering av målestasjon Sogndalsvatn og den neste aktuelle: Nessedalselva.



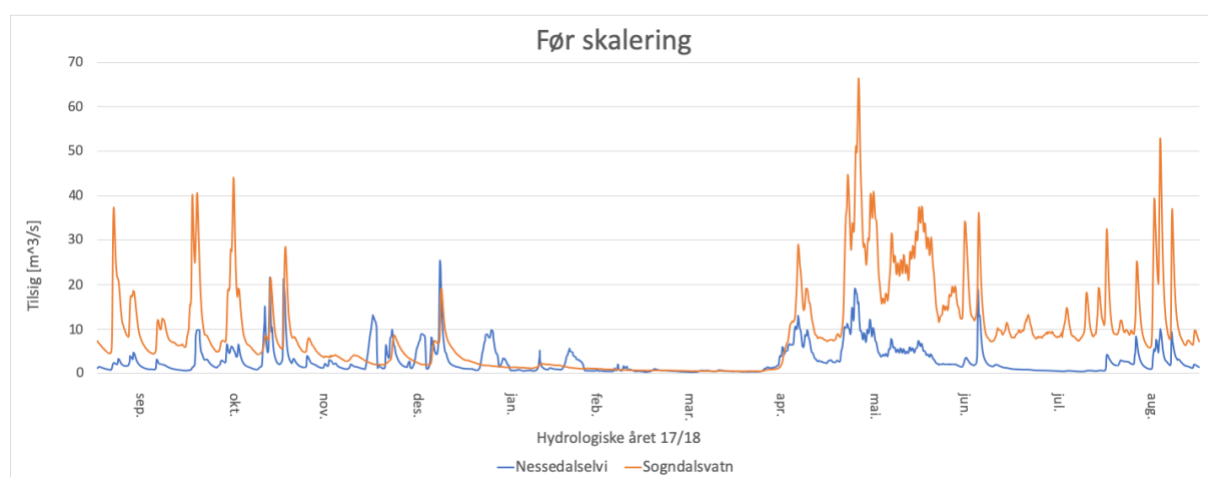
**Figur 6: Syner målestasjonar i nærleiken av Leikanger Kraftverk (NVE, 2019)**

Ny skalering vart utført med Nessedalselva som målestasjon. Tabell 3: Skaleringsfaktor for inntak, skalert frå Nessedalselva. Tabell 3 syner skaleringsfaktor frå både Sogndalsvatn og Nessedalselva.

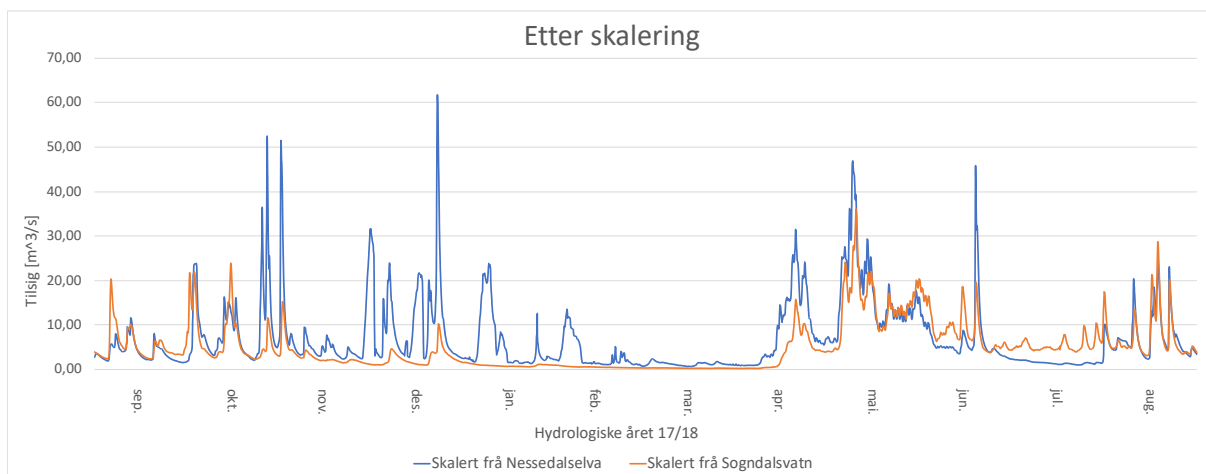
**Tabell 3: Skaleringsfaktor for inntak, skalert frå Nessedalselv**

	Skaleringsfaktor	
<b>Inntak</b>	Sogndalsvatn	Nessedalselva
<b>Skitstøla</b>	0,010	0,046
<b>Gildøla</b>	0,039	0,174
<b>Stavseta</b>	0,129	0,579
<b>Pyttane</b>	0,029	0,131
<b>Nyastøla</b>	0,010	0,043
<b>Friksdøla</b>	0,123	0,551
<b>Slettabotn</b>	0,064	0,289
<b>Traståna</b>	0,076	0,339
<b>Reisetåi</b>	0,062	0,279

Dataserie for både Nessedalselva og Sogndalsvatn vart lasta ned frå senorge.no (NVE, 2019) og deretter tilarbeidd i Excel. Dataserien til Nessedalsvatn hadde ei oppløysing på kvart 30 minutt og får å få timesoppløysing vart kvar heile halvtime (00:30, 01:30, 02:30 etc.) filtrert vekk. Nessedalselva og Sogndalsvatn hadde også hol i dataseriane. Sidan det var det var (på det meste) manglande 4 timar, så vart desse manglane fylt inn ved å ta gjennomsnittet av verdiane timen før og etter for å oppnå komplette dataseriar. Figur 7 samanliknar dataseriane til dei to målestasjonane for det hydrologiske året 17/18 (september 2017 til august 2018).

**Figur 7: Vassføringsdata for aktuelle målestasjonar, før skalering. Data frå senorge.no (NVE, 2019)**

Direkte ser Nessedalselva ut som eit godt val, medan Sogndalsvatn har ganske høge vassføringar sein vår og sommar som kan kome av snøsmelting. Kvart av dei ni inntaka skalerast med skaleringsfaktoren og tilsiget i timesoppløysing frå dataseriane. Frå dette får kvart inntak to dataseriar, ein skalert frå Sogndalsvatn og andre skalert frå Nessedalselva. Summen av tilsiget til inntaka skalert med Sogndalsvatn blir lagt saman til ein tilsigsverdi og det same blir gjort for Nessedalselva. I Figur 8 er summen av dei skalerte tilsiga plotta i ein graf.



**Figur 8: Vassføringsdata (sum av alle inntak) etter skalering**

I dataserien for inntaka, skalert frå Nessedalselva, visast effekten frå skalering frå det mindre feltet tydeleg i form av eit «skarpare» tilsgig, medan dataserien skalert frå Sogndalsvatn har fått dempa tilsgiget. Det er også synleg at mengde vatn er mykje større i serien skalert frå Nessedalselva enn den er for Sogndalsvatn, og dette fører til ei ekstra vurdering av val for målestasjon. I Tabell 4 under blir fleire kriterier samanlikna.

**Tabell 4: Utvida karakteristik for nedbørsfelta (NVE, 2019)**

Namn	Areal [km <sup>2</sup> ]	Spes.avr. [l/s*km <sup>2</sup> ]	Tilsgig [m <sup>3</sup> /s]	Kotehøgde [m.o.h.]	Sjø-% [%]	Bre-% [%]
Skitstøla	1,6	55,4	0,089	598 - 1153	0,4	0
Gildøla	5,3	63,7	0,338	607 - 1418	0	0
Stavseta	14,1	79,8	1,125	605 - 1533	0	0
Pyttane	3,3	77,0	0,254	600 - 1314	0	0
Nyastøla	1,2	69,8	0,084	590 - 1293	0	0
Friksdøla	13,3	80,4	1,069	606 - 1563	0	5,4
Slettabotn	6,6	85,0	0,561	608 - 1538	2,1	13,3
Traståna	8,6	76,6	0,659	601 - 1538	5,2	1,2
Reisetåi	11,0	49,2	0,541	594 - 998	5,4	0
Samla for inntak	65	70,8	4,602	594 - 1563	1,46	2,21
Nessedalselva	30,2	64,3	1,942	290 - 1346	1,3	0
Sogndalsvatn	112,1	77,7	8,710	395 - 1606	2,3	3,9

For kotehøgda er Sogndalsvatn eit betre alternativ sidan Nessedalselva ligg lågare i terrenget i forhold til kva høgde inntaka ligg ved. Målestasjonen Sogndalsvatn ligg også nærare interesseområdet. Bre- og sjøområder er også i Sogndalsvatn sin favør. Ei vurdering på kriteria over er gjort og kome fram til at Sogndalsvatn er representativt for

formålet sidan det var i denne oppgåva meir interessant å sjå på mengde vatn i tunnelsystemet.

Modellen vart i etterkant av vurderingane gjort i dette kapittelet utvida til å gjelde frå januar 2013 til desember 2018 for å ha same mengde hydrologiske data som elektrisitetspriser. Det vart også utført ein kontrollsjekk på at middelvassføring i den nye perioden (januar 2013 – desember 2018) var omtrentleg lik vurderingsåret (september 2017 – august 2018).

Fire bekkar har fått krav om minstevassføring (Sognekraft, 2009). Sognekraft har valt å auke minstevassføringa midtsommar i nokre av inntaka etter avtale med Leikanger Kommune (Kirkhorn, 2010). Tabell 5 under syner minstevassføringa for inntaka i forskjellige periodar.

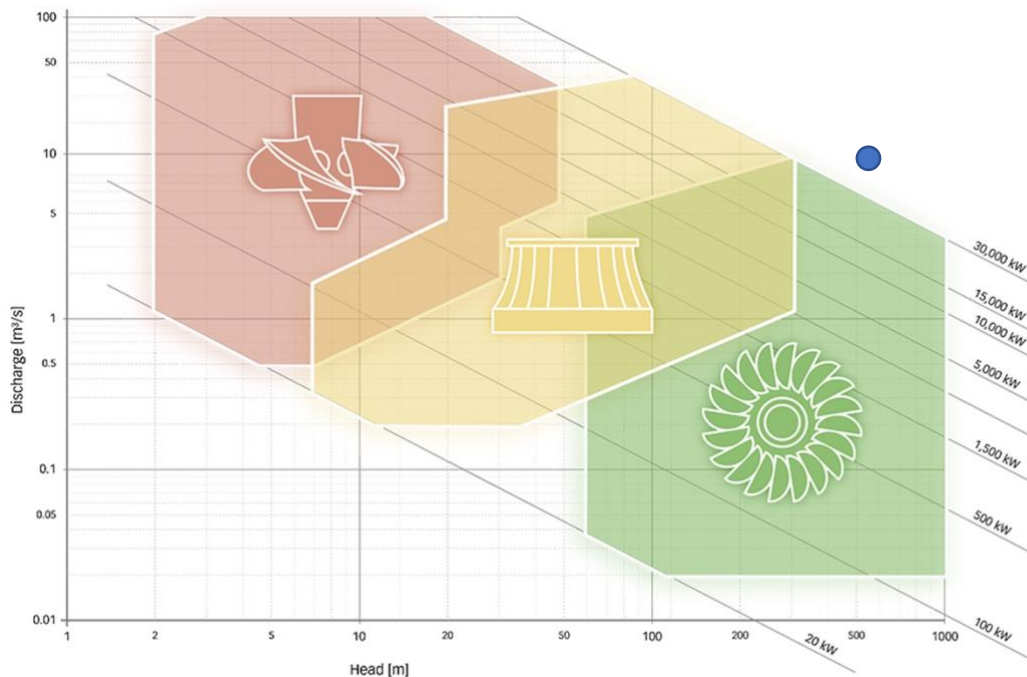
**Tabell 5: Minstevassføringar i prosjektet (Sognekraft, 2009)**

<b>Inntak</b>	<b>Periode</b>		<b>l/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>
<b>Stavseta</b>	01. mai	- 30. sep	164	0,1640
	01. okt	- 30. apr	82	0,0820
<b>Friksdøla</b>	01. mai	- 31. mai	152,4	0,1524
	01. jun	- 15. aug	452,4	0,4524
	16. aug	- 30. sep	152,4	0,1524
	01. okt	- 30. apr	80,4	0,0804
<b>Slettabotn</b>	01. mai	- 31. mai	76,2	0,0762
	01. jun	- 15. aug	226,2	0,2262
	16. aug	- 30. sep	76,2	0,0762
	01. okt	- 30. apr	40,2	0,0402
<b>Traståna</b>	01. mai	- 31. mai	25,4	0,0254
	01. jun	- 15. aug	75,4	0,0754
	16. aug	- 30. sep	25,4	0,0254
	01. okt	- 30. apr	13,4	0,0134

Etter skaleringa var utført, vart minstevassføringa trekt i frå dei respektive inntaka. Tilsig minus minstevassføring blei så summert saman frå inntaka som grunnlag for inndata til modell.

## 2.1.2 Verknadsgrader

Generelt er det Francis, Pelton og Kaplan som blir brukte i vasskraftverk. Det er også andre typar som er mindre utbreidd. I korte trekk blir Pelton turbinar brukt ved store fallhøgder og mindre vassføringar, Francis ved medium fallhøgder og medium vassføringar, og Kaplan ved små fallhøgder og store vassføringar. Figur 9 viser eit forenkla turbinvalskjema basert på fallhøgde og vassføring. For meir nøyaktig val brukas fartstal til å setje turbin og dimensjonar.



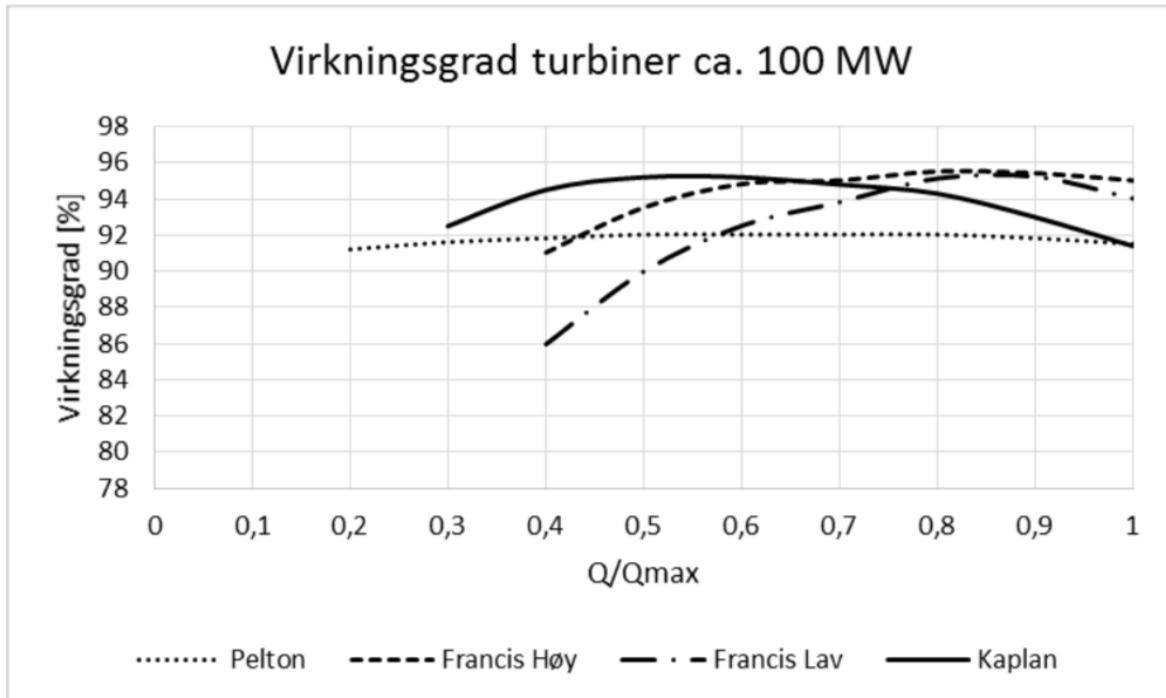
**Figur 9: Turbin typer Kaplan (raudt), Francis (gult) og Pelton (grøn) (ANDRITZ HYDRO GmbH, 2018). Blå runding er Leikanger Kraftverk.**

I modellen vil turbinen operere på ulike vassføringar og ulike vassføringar gjev ulik grad av effektivitet som påverkar produsert effekt jamfør med formel (6) under:

$$P = \rho_w * g * \eta * H * Q \quad (6)$$

$P$	Effekt	[W]
$\rho_w$	Densitet til vatn	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Tyngdas akselerasjon	[m/s <sup>2</sup> ]
$\eta$	Verknadsgrad	
$H$	Fallhøgde	[m]
$Q$	Slukeemne	[m <sup>3</sup> /s]

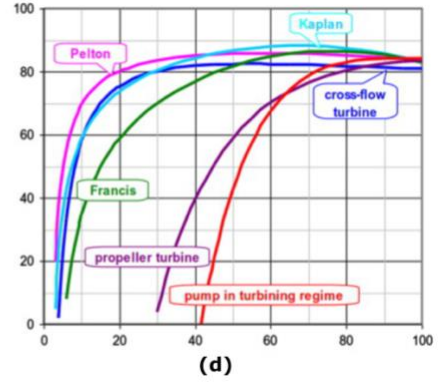
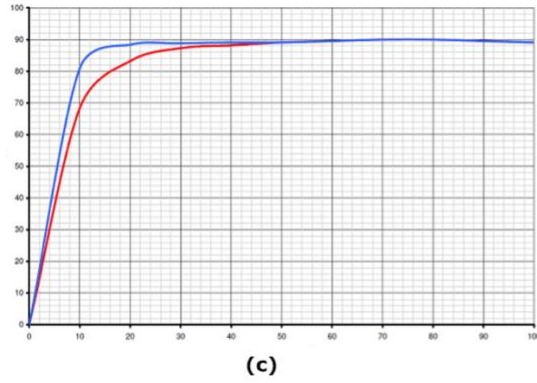
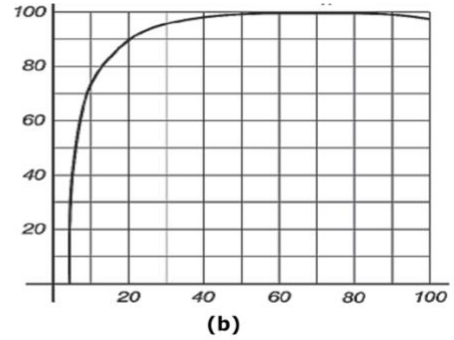
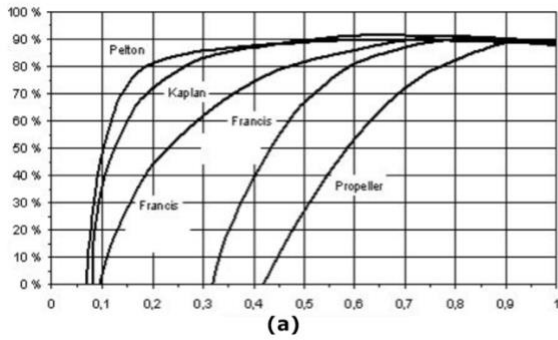
Mange av dei typiske verknadsgradkurvene tilgjengeleg på nett og publikasjonar er basert på eldre maskiner med utdaterte verdiar. Teknologien har kome såpass langt at dagens turbinar har ei høgare verknadsgrad enn tidlegare. NVE har ei kurant verknadsgradkurve vist i Figur 10 frå rapporten «Kostnadsgrunnlag for vannkraft» (Stensby, 2016).



**Figur 10: Verknadsgradskurve for store turbinar frå NVE sitt kostnadsgrunnlag (Stensby, 2016)**

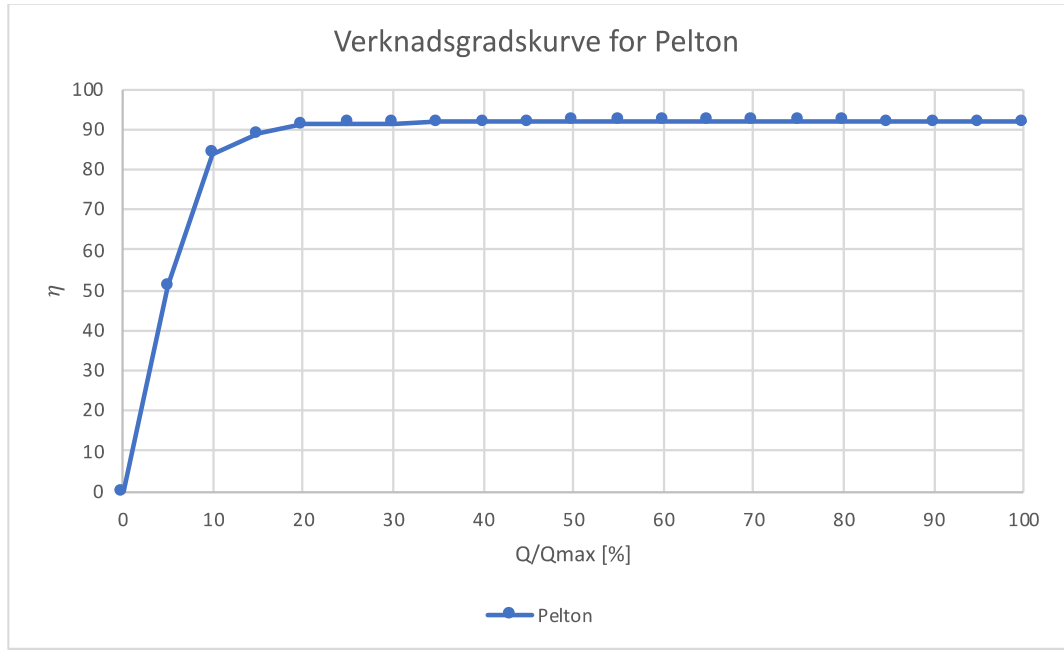
Verknadsgradskurva for Pelton i Figur 10 viser Pelton turbinens styrke. Pelton kan operere jamt over eit større område (mengde vatn som prosent av slukeemna til turbinen), men med ei lågare verknadsgrad samanlikna med Francis og Kaplan turbinar. Grafen gjev kurante tal, men manglar område frå 0 % til 20 %. Det kan tenkjast at det vil være tilfelle der vassføringa er lågare enn 20 % av slukeemna til turbinen. Til å fylle inn området som manglar i kurva over er det sett på andre liknande kurver vist i Figur 11.





**Figur 11: Verknadsgrader brukt til å lage ny kurve, (a) Samanliknar forskjellige turbinar (Quaschnig, 2015), (b) kurve for mindre Pelton turbinar (Kahfi, 2010), (c) 1 og 2 strålar Pelton av nyare dato (First, 2015), (d) Forskjellige turbinar til samanlikning (Jain & Patel, 2013).**

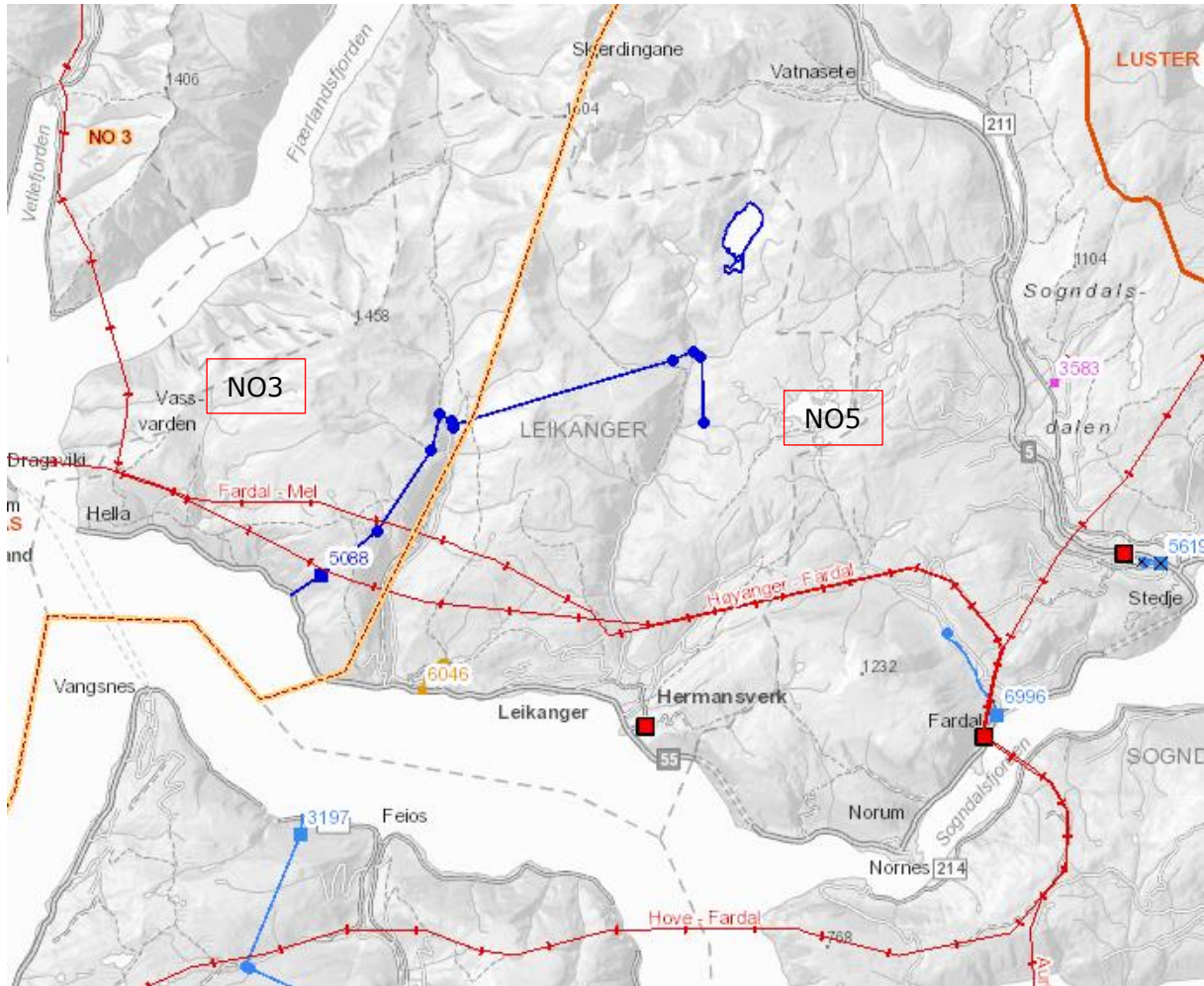
Frå Figur 11 er punkt visuelt lest av og satt inn i Excel. For å ha ei representativ verknadsgradkurve, blir punkt frå Figur 10 og Figur 11 slått saman til ein ny graf vist i Figur 12. Verdier frå Figur 12 brukast vidare i oppgåva.



**Figur 12: Verknadsgradskurve for Pelton med funksjon av relativt tilsig (Q/Qmaks)**

### 2.1.3 Elektrisitetspriser

Kraftleverandørar sel krafta dei produsera på det som kallast kraftbørsen. Nord Pool ASA er kraftbørsen for nordiske land og handlar totalt med 13 land (Nord Pool ASA, u.å). Norge er delt inn i fem prisområder, NO1 til NO5. Leikanger Kraftverk ligg både i sone NO3 og NO5 som vist i Figur 13 under der gul med raudstipla linje er grensa mellom prisområde. I oppgåva er det teke utgangspunkt i at straum leverast til koplingsanlegg (markert med raud firkant på figur) ved Hermansverk eller ved Fardal, og dermed prisområde NO5.

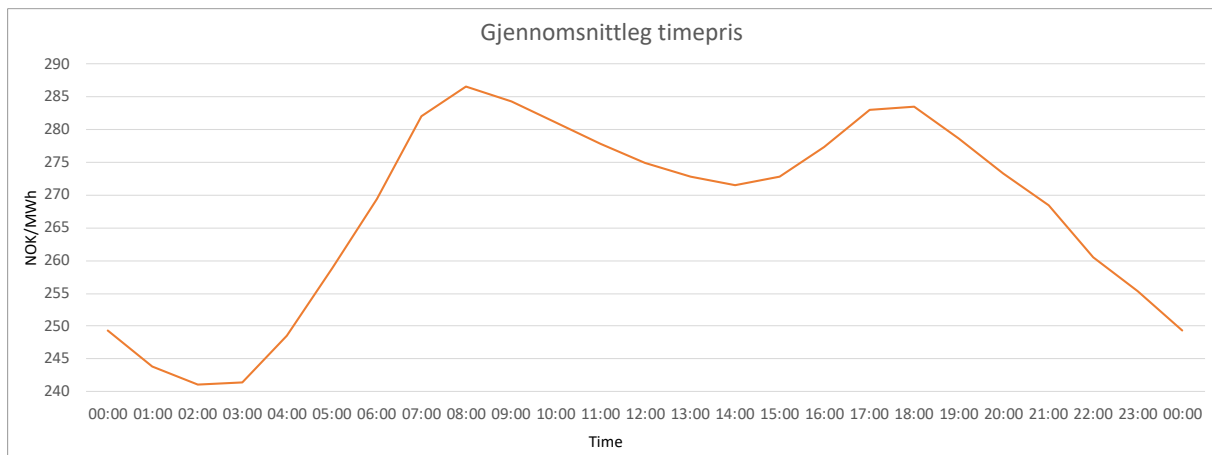


**Figur 13: Utsnitt frå NVE Atlas, prisområde og kraftverk (NVE, 2019)**

I [www.nordpoolgroup.com](http://www.nordpoolgroup.com) ligg prisar med timesoppløysing tilbake til 01.01.2013 (Nord Pool ASA, 2015-2018). Naudsynte dokument som innehaldt timesoppløysingar blei lasta ned og deretter sortert ut prisområde NO5. Datoar og klokkeslett vart konvertert til same format og synkronisert som hydrologiske data for å unngå moglege problem.

## 2.2 Korleis modellen fungerer

For å løyse oppgåva vart modellen laga som ein rein prismodell og har som mål å prioritere tilgjengeleg vatn til høgst prisar innan eit døger (24 timar). Normalt sett er det om morgonen i tidsrommet 06-11 det er høgast prisar og på ettermiddagen i tidsrommet 16-19. Figur 14 under som viser gjennomsnittleg timepris i perioden 2013 til 2018, kan bekrefte dette.



**Figur 14: Gjennomsnittleg timespris for perioden 2013-2018 (Nord Pool ASA, 2015-2018)**

Ved å prioritere høgste pris vil det bli vanskeligare å tildele vatn med tanke på at kvar dag har ulike tidspunkt for høgste pris. Tabell 6 viser prisane for tre tilfeldig valte døgn og med betinga formatering er forskjellen (farge) frå time til time tydeleg.

**Tabell 6: Pris for tre tilfeldig valte dagar med betinga formatering (mørkare grøn = høgare pris), enhet: øre/kWh**

	lørdag 24.05.2014	onsdag 06.09.2017	fredag 19.01.2018
00:00	7,864	28,174	28,814
01:00	7,222	27,886	28,786
02:00	7,011	27,608	28,325
03:00	6,589	27,682	28,392
04:00	6,426	27,895	28,834
05:00	7,157	28,155	30,505
06:00	5,711	28,591	37,209
07:00	6,662	28,758	47,88
08:00	8,425	29,074	49,887
09:00	9,659	29,055	48,37
10:00	9,57	29,009	47,621
11:00	9,245	28,888	45,027
12:00	8,806	28,833	41,291
13:00	8,018	28,814	40,023
14:00	7,628	28,768	37,929
15:00	7,539	28,48	38,842
16:00	7,742	28,396	41,195
17:00	8,035	28,378	46,084
18:00	7,905	28,313	46,247
19:00	7,109	28,517	39,831
20:00	6,979	28,341	36,988
21:00	7,312	28,072	35,077
22:00	10,317	27,821	33,694
23:00	10,611	27,199	31,321

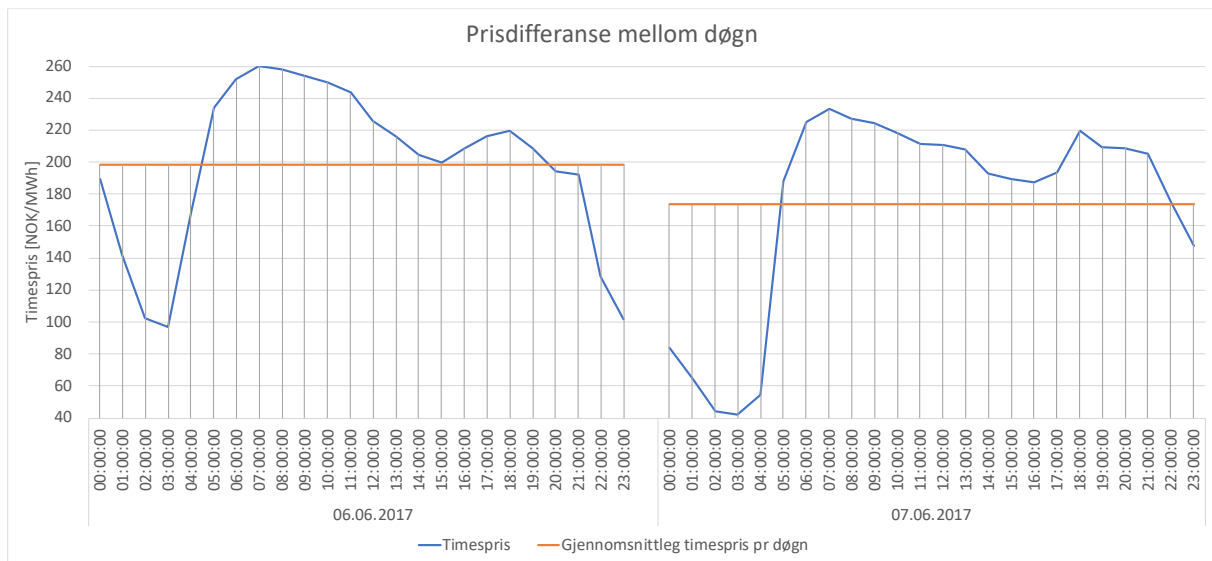
I ein kommersiell modell vil det være meir dynamikk bak dette. Både nedbørs- og prisprognoser for kommande døgn, verknadsgrader, vassverdi og andre kraftverk i systemet vil spele inn på ein kommersiell modell.

Forskyve produksjon mellom døgn basert på strategi er ganske vanskelig å få til på grunn av ulikskapen av når det er høge prisar som sett i Tabell 6 over. Derfor er det valt å gjere ei forenkling. Fordelane ved å lage ein modell i Excel er at alle funksjonar og reknemåtar som ligg bak den er kjent. For å få modellen til å fungere innanfor tidsramma av oppgåva, blei det valt å løyse det på følgjande måte:

- Ser på kvart døgn og utføre utrekningar innanfor denne tidsramma (24 timar)
- Ved start av nytt døgn blir modell/balanse tilbakestilt
- Gjenta for heile dataserien

Dette medfører nokre fordelar og ulemper. Det vil ligge ein «feil» i systemet sidan magasinet moglegvis kan bli fullt (eller tomt) før modellen får køyrt ut produksjonen (i løpet av ein dag). Dette er ein feil som høvesvis vil overestimere produksjonen for kvart døgn. På same tid vil produksjonen også underestimere, med at høve for overføring vatn til neste døgn forsvinn.

Under er eit eksempel for å forklare over- og underestimeringa gjort i oppgåva.



**Figur 15: Prisdifferanse mellom døgn**

Prisane presentert i Figur 15 viser at prisnivået er lågare om natta. Sidan modellen restartar kvart døgn mistar modellen dermed høve til å overføre vatn frå kvelden før. Det optimale, gjeve at det ikkje har kome for mykje tilsig inn, ville ha vore å kunne spare vatn frå kvelden før, f.eks. frå kl. 21:00, og bruke vatnet dagen etter frå kl. 05:00 eller seinare. Sjølv om modellen mistar høve til å overføre vatn mellom døger, så vil kraftverket til gjengjeld prioritere vatn å produsere på dei høgaste prisane.

I modellen laga for oppgåva blir det dermed ikkje ei teknisk vurdering på når kraftverket bør slutte å kjøre, men heller ei taktisk vurdering basert på prisforventning for det aktuelle døgn.

## 2.3 Oppbygging av modell

Excel-modellen utvikla for å simulere Leikanger Kraftverk, er delt inn i fleire rekneark som jobbar saman. For å halde god oversikt får kvar funksjon i modellen eige ark. Eksempelvis vart dei klargjorte hydrologiske dataa frå kapittel 2.1.1 ovenfor lagt i eit eige ark, medan elektrisitetsprisar vart lagt i eit anna ark i same reknebok.

Modellen er bygd opp som eit vassbalanseskjema. Heilt enkelt kan det seiast at innkomande vatn (tilsig) er lik utgåande vatn og balanse blir oppnådd ved at det går like mykje vatn ut som inn. Tabell 7 viser oppbygging av berekningsarket i modellen, sjå også vedlegg 2 for illustrasjon av rekneark.

**Tabell 7: Oppbygging av modell i rekneark**

Kolonne	Funksjon	Vidare forklaring
<b>A</b>	Dato	Kronologisk rekkjefølgje
<b>B</b>	Klokkeslett	Kronologisk rekkjefølgje
<b>C</b>	Tilsig	Følgjer kolonne A og B
<b>D</b>	Sum av tilsig per døgn	Sjå delkapittel 2.3.1
<b>E</b>	Sortert time (etter pris)	Sjå delkapittel 2.3.2
<b>F</b>	Sorterte prisar	
<b>G</b>	Vassbalanse	Sjå delkapittel 2.3.3
<b>H</b>	Vassbalanse	
<b>I</b>	Vassbalanse	
<b>J</b>	Vassbalanse	
<b>K</b>	Vassbalanse	
<b>L</b>	Finne $H_{brutto}$	Sjå delkapittel 2.3.4
<b>M</b>	Friksjonstap	Sjå delkapittel 2.3.5
<b>N</b>	Singulærtap	Forenkla og satt til ein fast verdi.
<b>O</b>	$H_{netto}$	$H_{netto} = H_{brutto} - Friksjonstap - Singulærtap$
<b>P</b>	Last	Reknar ut last som funksjon av tilsig ( $Q/Q_{maks}$ )
<b>Q</b>	Verknadsgrad av fallhøgde	Sjå delkapittel 2.3.6
<b>R</b>	Verknadsgrad for turbin	Grunnlag forklart i 2.1.2 Verknadsgrader. Nyttar lasta frå kolonne P og returnera verknadsgrad for turbin.
<b>S</b>	Verknadsgrad for elektrisk utstyr	Generator (konstant) 98 % effektivitet. Transformator (konstant) 99 % effektivitet. Nyttar lasta frå kolonne P og returnera verknadsgrad for elektrisk utstyr.
<b>T</b>	Effekt/energi	Reknar ut effekt. Sidan det allereie er i tidssteg på ein time blir resultatet i kWh. Tyngdas akselerasjon ( $g$ ) = 9,81 m/s <sup>2</sup> Formel nytta: $P = \frac{\rho}{1000} * g * \eta_{turbin} * \eta_{el.utstyr} * \eta_{fallhøgde} * H_{netto} * Q$
<b>U</b>	Omrekning	kWh → MWh
<b>V</b>	Forteneste i NOK	MWh ganger pris frå same tidssteg
<b>W</b>	El.sertifikat	Avrunda ned for å sjekke eventuelle el.sertifikater. Sidan el.sertifikat gjeld for pr MWh levert blei kvart tidssteg runda ned til heiltal.

Alt repeterast så i tidssteg nedover. Sluttresultatet, i form av produksjon og inntening, vil bli summert og presentert i kapittel om resultat.

### 2.3.1 Sortering av tilsig

Kolonne D klargjer sum av tilsig pr. døgn. For å få ein summert verdi av tilsig pr. døgn vart det laga ein makro. Denne makroen hentar ut summert verdi frå Pivot-tabell og returnera den ved første tidssteg i gjeldande døgn. Dette gjer den så vidare for resten døgn i serien. Makroen ligg i vedlegg 3, markert som «Makro 1».

### 2.3.2 Sortering av pris

Kolonne E viser time sortert etter prisane i kolonne F. Dette er tatt med for eventuell kontroll av sortering. Kolonne F viser dei sorterte prisane innan kvart døgn.

Modellen skal ha pris sortert frå høgst til lægst innanfor kvart døgn og deretter repeterer for tal dagar i modellen. For å få dette til, må det programmerast ein kode, ofte kalla makro, og makroen under tek seg av denne operasjonen. Her forklarast stega i «Makro 2» med korte trekk:

1. Vel tal steg (tal dagar (f.eks.  $N = 365$ )) og startar første ( $N = 1$ ) steg.
2. Vel dei første verdiane, startrad ( $k = 4$ ) og 23 rader ned (totalt 24 rader), markerar desse radene i kolonne for time og pris.
3. Kopiera valte celler til eit nytt ark (mellomrekningsark).
4. Sortera valte verdier frå høgst til lågast pris.
5. Flyttar dei sorterte cellene inn til rekneark for vassbalanse (V.B.Makro).
6. Fortel at neste steg skal starte i neste celle etter siste rad brukt ( $k = k + 24$ )
7. Startar nytt steg, repetera prosessen til tal steg er utført (når  $N = 365$ ).

«Makro 2» kan også sjåast i vedlegg 3.

### 2.3.3 Køyring av kraftverk (vassbalanse)

Kolonnane G, H, I, J og K er øyremerkta utrekningar i vassbalanse.

Kolonne **G** attgjev verdi frå kolonne D for å få visuelt betre oversikt i rekneark.

Kolonne **H** delar inn data frå kolonne G. Gjer dette ved å ta verdi i kolonne G frå førre tidssteg, legg til verdi frå kolonne H og trekk frå verdi som går til turbin. Dette er gjort for å få alle tidsstega til å gå i balanse. Dersom kolonne G er større enn null, så set den berre inn  $G_{n-1}$ .

$$H_n = G_{n-1} + H_{n-1} - I_{n-1} \text{ (her denoterast stor bokstav som kolonne)}$$

Kolonne **I** ser på verdi i kolonne H frå same tidssteg og sjekkar først om det er nok vatn til å kjøre turbin (nedre grense). Viss ja, så sjekkar den om det er meir vatn enn slukeemna (øvre grense) og tildelar vatn til turbin opptil øvre grense.

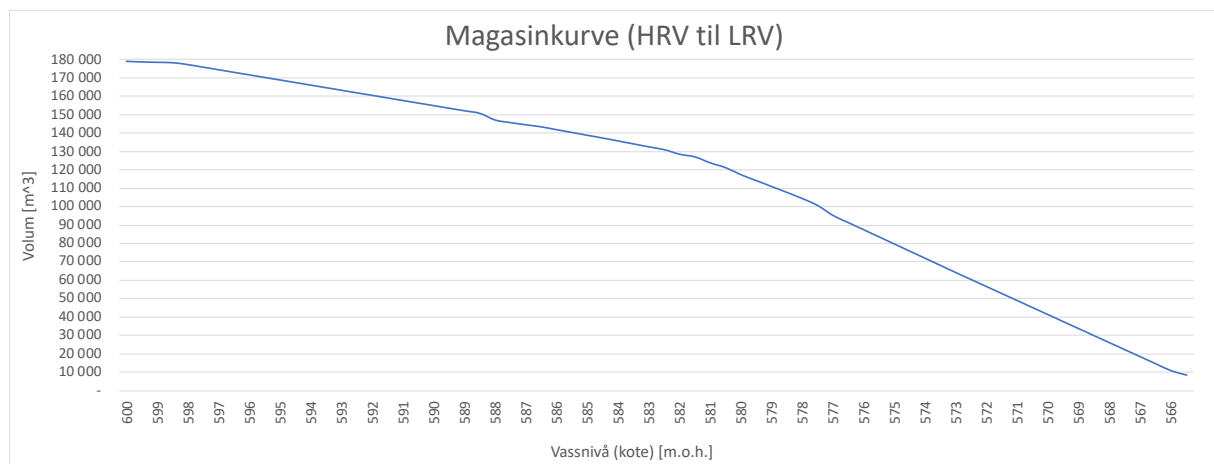
Kolonne **J** ser på vatn som er tilgjengeleg etter turbin (kolonne I).

Kolonne **K** tar vatn frå kolonne J og «fyller» opp magasinet til maks volum gjeve frå magasinkurve. Med andre ord vil gjeldande magasinivolum gjeve i kolonne K brukast til å finne fallhøgda i systemet.

### 2.3.4 Definerer av fallhøgde

Sjekkar den gjeldande fallhøgda ut frå volumet i magasin. Dette får den tak i ved å samanlikne volumet i magasinet mot magasinkurva og får dermed ut ein verdi for brutto fallhøgde.

Kurva er laga ved kalkulasjon av kvar tunneldel frå teikningar oppgjeve frå kraftverkseigar i steg på 0,5 høgdemeter. I tillegg til oppgjevne verdiar frå tunneldel er det også lagt inn forenkla tal og volum på nisjar. Det som utgjer volumet i magasinkurva er hovudtunnelstreng, sjakt til inntaka, stollar og nisjar.



**Figur 16: Magasinkurve for dagens løysing**

Frå (Nilsen & Thidemann, 1993) er det naudsynt med nisjar for kvar 100 – 150 meter og med største hellingsgradient på 15 %. I oppsettet til magasinkurva er det teke utgangspunkt i del av tunnel som går frå trykksjakt og til enden som gjev ei omtrentleg lengde på 11 650 meter. Med ei nisje kvar 150 meter vil totalt tal nisjar her være 78. Dersom nisjane er 8 meter djupe, 6 meter breie og med same høgde som hovudtunnel vil volumet bli ca. 250 m<sup>3</sup> for kvar nisje. For enkelheitas skuld er nisjane lagt inn med 0 m<sup>3</sup> ved kote 545 og stiger lineært til ca. 19 410 m<sup>3</sup> (250 m<sup>3</sup> multiplisert med tal nisjar, 78) ved kote 600.



### 2.3.5 Falltap

Reknar ut falltap (friksjonstap) i tunnelsystem. Tek utgangspunkt i mengde vatn til turbin i tidssteget frå kolonne I. Denne verdien gjerast så om til prosent av  $Q_{maks}$ . Heretter sjekkar den vidare mot ein tabell som er laga med falltap ved kvar prosent av  $Q_{maks}$ .

For å få falltap er Mannings formel nytta (Bachke, et al., 2010).

$$h_{tap} = \frac{L * Q^2}{M^2 * A^2 * R_{hy}^{\frac{4}{3}}} \quad (7)$$

$L$	Lengde på tunnel	[m]
$Q$	Slukeemne	[m <sup>3</sup> /s]
$M$	Mannings friksjonskoeffisient	[m <sup>1/3</sup> /s]
$A$	Areal (tverrsnitt til tunnel)	[m <sup>2</sup> ]
$R_{hy}$	Hydraulisk radius	[m]

Kvar del av tunnel er rekna uavhengig for meir nøyaktig resultat.

### 2.3.6 Effektiv (høgde) verknadsgrad for turbin

Finner verknadsgrad av fallhøgde ved å bruke verdi for  $H_{netto}$  frå kolonne O.

Operasjonshøgde for Pelton:

Normalt sett blir Pelton brukt med ei fast fallhøgde (i verkelegheita har den ofte 0,5 – 1,0 meter regulering, men kan reknast som neglisjerbart ved høgtrykksanlegg sidan det omtrent ikkje har påverknad på produksjonen). Som tidlegare nemnt har Leikanger Kraftverk ei aktiv regulering på ca. 35 meter som er satt frå omsyn til lokale forhold. Men kor stort område kan eigentleg ein Pelton operere i?

Pelton er ein impulsturbin (også kalla partialturbin og fristråleturbin). Det er trykket til strålen, altså hastigheita, som skubbar bøttene på Pelton løpehjulet rundt. Ein optimalt utforma Pelton har ei vasshastigheit ut av dysa som er nær dobbel av periferihastigheita til løpehjulet. Denne effekten på løpehjulet finn ein også i NVE sin «Veileder i kvalitetssikring av små vannturbiner» (Kjølle, 2007):

$$u_1 = \frac{c_1}{2} \quad (8)$$

der  $u_1$  er løpehjulets omdreiingshastigheit og  $c_1$  er vasspartikkelens absolutthastigheit. Null effekt på løpehjulet oppstår når vasspartikkelen har same hastigheit som løpehjulet, m.a.o. at vasspartikkelen ikkje lenger når igjen løpehjulet:

$$c_1 - u_1 = 0 \quad (9)$$

$$c_1 = u_1 \quad (10)$$

Vidare får hastigheita til vasspartikkelen ut av dysa følgjande likning:

$$c_1 = \varphi * \sqrt{2 * g * H_n} \quad (11)$$

der  $\varphi$  er friksjonstap i dysa og settast lik 0,98.

Løpehjulet har følgjande likning:

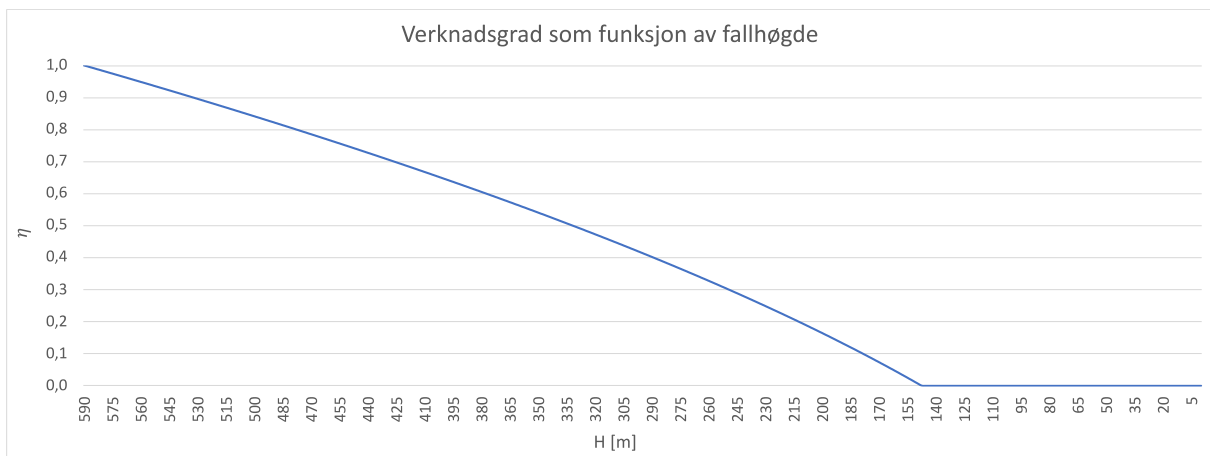
$$u_1 = \frac{\omega * D}{2} = 0,48 * \sqrt{2 * g * H_n} \quad (12)$$

For å få lågaste fallhøgde ut frå formel (10) må formel (11) og (12) tilpassast. Sidan løpehjulet blir tilpassa frå HRV, betyr det at det er likninga for vasspartikkel som må tilpassast. Med å snu med omsyn på  $H_n$  frå formel  $c_1$  vil følgjande likning oppnåast:

$$H_{n,LRV} = \frac{\left(\frac{0,48 * \sqrt{2 * g * H_{n,HRV}}}{0,98}\right)^2}{2 * g} \quad (13)$$

Veldig forenkla, med å sjå vekk frå friksjonstapa, vil følgjande likning kunne brukast som ein generell forutsetning:

$$H_{n,LRV} = \frac{H_{n,HRV}}{4} \quad (14)$$



**Figur 17: Verknadsgradkurve som funksjon av fallhøgde**

Vidare i modellen vil likning (13) nyttast. Informasjonen over tydar at, teoretisk sett, kan ein Pelton kjørast heilt til vasstråla ikkje lenger tek igjen skåla. Figur 17 viser verknadsgradskurva der  $H_n = 590$ . Den gjeldande høgda frå kvart tidssteg vil gje ein verdi for verknadsgrada ut som går inn i effektformelen. Med å ha eit auka reguleringsnivå, vil aktivt volum bli større.

## 2.4 Dei ulike simuleringane

Her blir dei forskjellige alternativa som er valt å simulere beskriver. Kvar underoverskrift fortel om det spesifikke alternativet og kva som gjer det ulikt frå andre val. Felles for alle alternativ er at det er sett vekk ifrå tidsforseinking av vatn mellom inntak, som også er med på å underestimere modellen. I verkelegheita har ein litt betre fordeling av vatn med tidsforskjell. Med andre ord; reknar med at alt vatn kjem inn på same tid. Tunnel til samtlege inntak må takast med i alle tilfelle for å samle vatn.

Det er valt å undersøke følgjande alternativ for utforming av magasin i tunnel:

1. Utan regulering (fast fallhøgde)
2. Dagens løysing
3. Dagens løysing med auka reguleringsnivå.
4. Bergrom (vertikal sjakt)
5. Bergrom (vertikal sjakt) med auka reguleringsnivå
6. Skråtunnel
7. Skråtunnel med auka reguleringsnivå

For å oppnå best mogleg samanlikningsgrunnlag mellom alternativa er det valt å halde fleire føresetnadar like. Frå alternativa over er det einaste skilnaden mellom punkt 2. og 3., 4. og 5., 6. og 7. delen om auka reguleringsnivå. Med dette meinast det verdi for LRV og kor langt det er teoretisk mogleg å køyre turbinen som forklart i delkapittel 2.3.6. Med dette i betraktning delar punkt 2. til 7. følgjande føresetnadar:

- Tatt i bruk tunnelmagasin.
- Varierende fallhøgde er inkludert i modellen.
- Operasjonsstrategi: nyttar prisoptimalisering forklart i delkapittel 2.2.

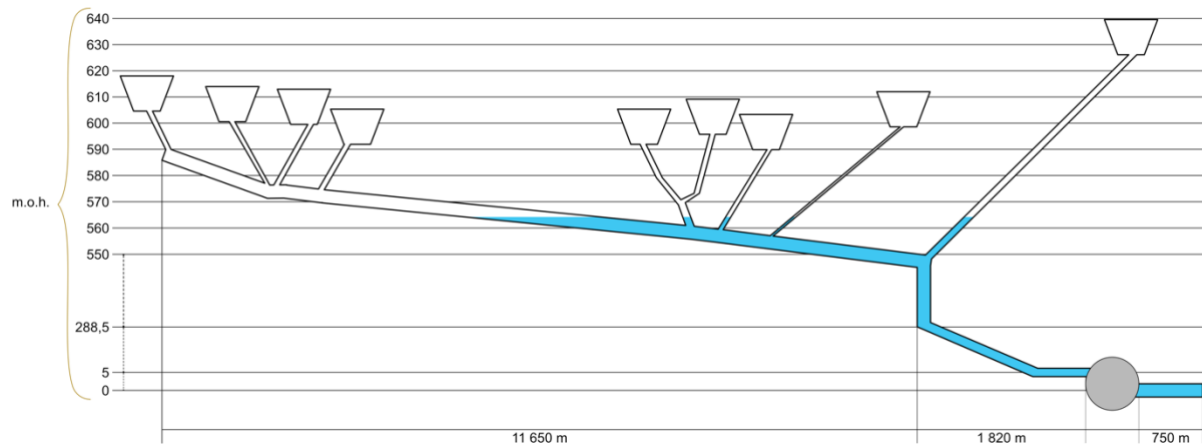
### 2.4.1 Alternativ 1. Utan regulering

Dette alternativet beskriv korleis det ville ha vært dersom Leikanger Kraftverk hadde blitt bygd som eit typisk elvekraftverk utan tunnelmagasin, altså eit kraftverk som berre køyrer på det vatnet som kjem inn i den augneblinken. Følgjande føresetnadar er satt:

- Tilsig og prisar i kronologisk rekkjefølgje.
- Fast fallhøgde satt til HRV (ca. 600 m.o.h.)

### 2.4.2 Alternativ 2. Dagens løysing

Dette alternativet er slik som det er planlagt utført frå byggherres side, basert på tolkingar av informasjon motteke. Lokale, tekniske avgrensingar er også teke med, eksempelvis svakheitssone som gjer at det vart valt å flytte grense for LRV høgare i kote. Biletet under illustrera oppsettet for dagens løysing. Aktiv reguleringshøgde er ca. 35 meter (kote 565 til 600).



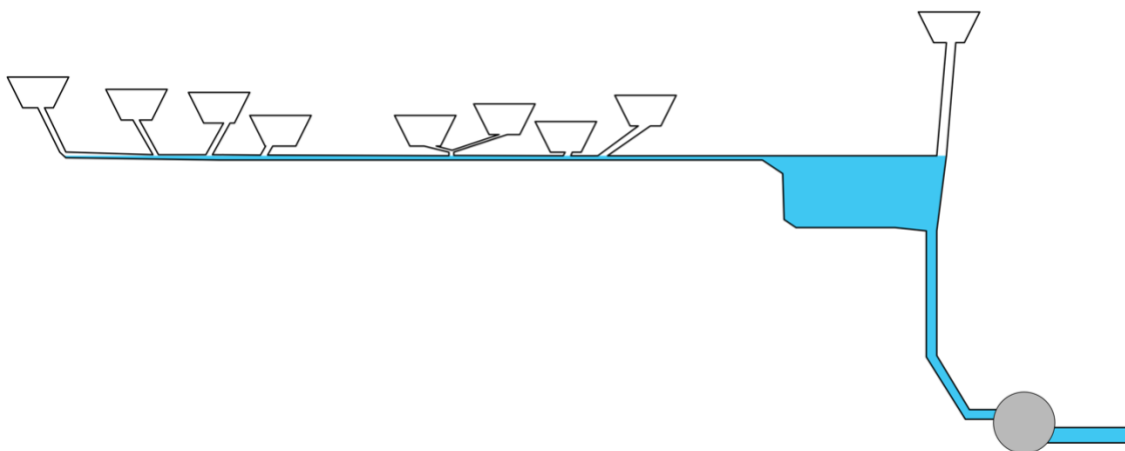
**Figur 18: Illustrasjon av alternativet «Dagens løysing»**

### 2.4.3 Alternativ 3. Dagens løysing med auka reguleringsnivå

Jamfør med turbinteori om kor langt ned i fallhøgde ein Pelton turbin kan operere ved, er dette alternativet likt som det beskrive i Alternativ 2, men slepp fallhøgda lenger ned. Figur 18 er fortsatt gjeldande. Ser vekk frå lokale forhold, eksempelvis geologiske forhold, og får her ei aktiv reguleringshøgde på ca. 445 meter (kote 155 til 600). Får også auka volum grunna auka i regulingsnivået.

### 2.4.4 Alternativ 4. Bergrom (vertikal sjakt)

Dette alternativet kan reknast som eit ekstremtilfelle. Her brukast ikkje heile tunnelsystemet som magasin, men det blir teke utgangspunkt i ein mindre tunnel for å føre vatnet til magasin delen. Aktiv reguleringshøgde settast lik alternativ 2. Figur 19 illustrera alternativ for bergrom.



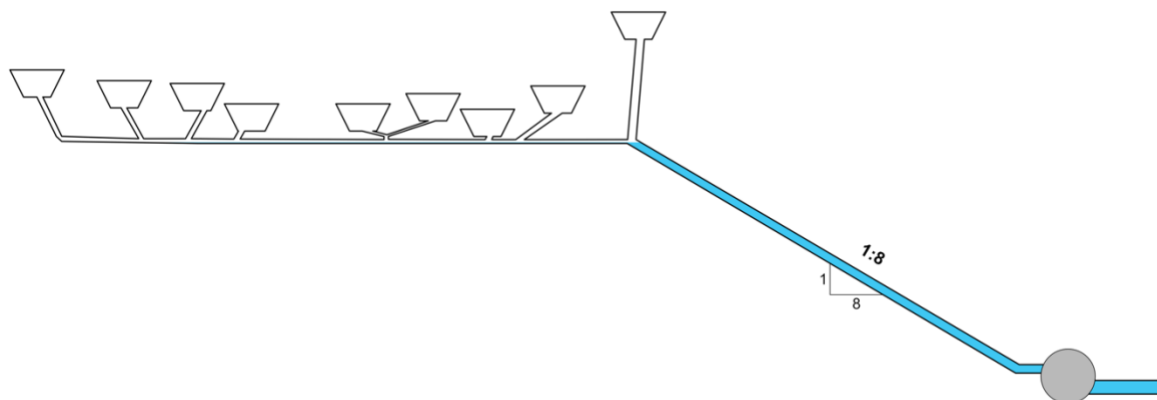
**Figur 19: Illustrasjon av alternativet «Bergrom (vertikal sjakt)»**

#### 2.4.5 Alternativ 5. Bergrom (vertikal sjakt) med auka reguleringsnivå

Likt som alternativ 4. Bergrom, men går i dette tilfellet like langt ned som alternativ 3. Figur 19 er fortsatt gjeldande. Som i alternativ 3. ignorerast også lokale forhold og får same reguleringshøgde (445 meter (kote 155 til 600)). Får også auka volum grunna auka i regulingsnivået.

#### 2.4.6 Alternativ 6. Skråtunnel

Ofte er det byggtekniske forhold som set grense for kor bratt tunnel kan drivast. Brattare tunnel medfører oftast høgare kostnad. Her vil magasindel ligge i skråtunnel og dermed ha eit stort tverrsnitt for å oppnå riktig volum.



**Figur 20: Illustrasjon av alternativet «Skråtunnel»**

#### 2.4.7 Alternativ 7. Skråtunnel med auka reguleringsnivå

Lik som alternativ 6. Skråtunnel, men går i dette tilfellet like langt ned som alternativ 3. Figur 20 er fortsatt gjeldande. Igjen så blir lokale forhold ignorert og får same reguleringshøgde (445 meter (kote 155 til 600)). Får også auka volum grunna auka i regulingsnivået.

## 2.5 Kostnadar

Fram til dette delkapittelet er berre inntektssida vurdert, utan å ta med kostnadar, og dette vil ikkje gje riktig resultatet. For å få eit betre grunnlag for samanlikning må kostnad også takast med. I alle høva vil alternativa ha like føresetnadar bortsett frå tunnel og dermed vil berre tunnelkostnaden være brukt for samanlikninga av alternativ. Felles for alle alternativ er at det må byggast tunnel til inntaka for å få tak i vatnet, men størrelsen og utforming vil variere basert på alternativ.

Det er mykje som spelar inn på kostnaden for tunnel; tunneldrivemetode, tverrsnitt og lokale forhold for å nemne nokre. Som tidlegare nemnt ønskast det å halde variablar mest mogleg likt for å ha eit betre grunnlag for samanlikning mellom alternativa.

Følgjande utgangspunkt er tatt:

- Drive tunnel med hjuldrift
- Kostnadskurver frå NVE «Kostnadsgrunnlag for vannkraft» (Stensby, 2016)
- For alternativ med bergrom er det tatt utgangspunkt i einingspris (kr/m<sup>3</sup>) for kraftstasjon i berg. Sidan det skal sprengast eit bergrom kan denne prisen senkast (mindre krav og enklare «kutt»).
- For alternativ med skråttunnel er det stor uvisse i pris. Det er valt å legge på 20 % auke i kostnad for skråttunnel med utgangspunkt i driving på stigning. .

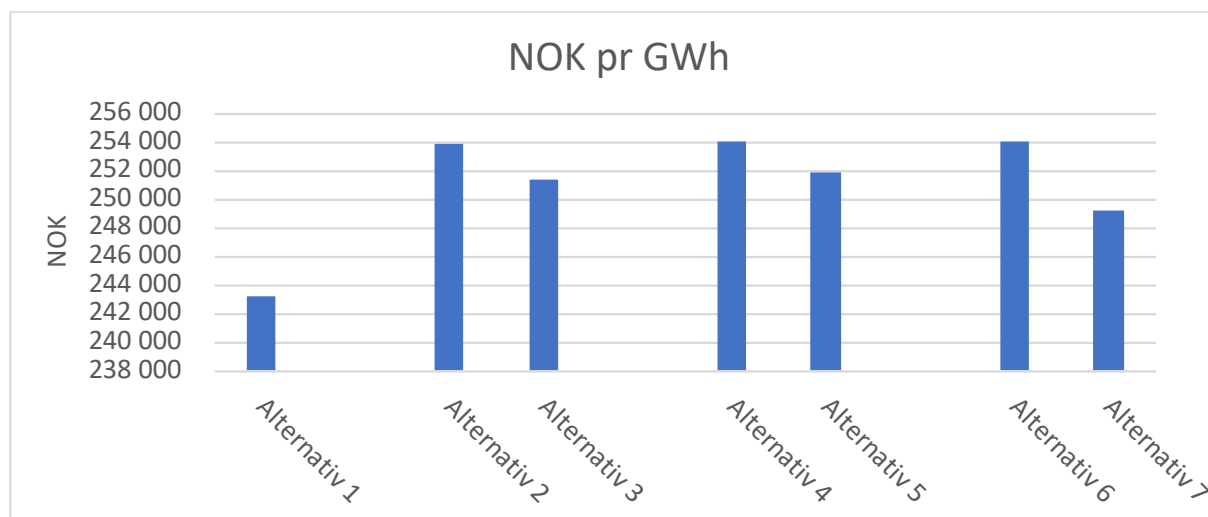
### 3 Resultat

I oppgåva er det gjort produksjonsberekningar for sju ulike alternativ. Alle berekningane er basert på seks år med data (2013-2018) og tal presentert i dette kapittelet er gjort om til verdiar pr. år, altså sum frå dei seks åra delt på seks år, og kan sjåast i Tabell 8.

**Tabell 8: Oversikt av produksjon og inntening i årsverdiar for alternativa**

	<b>Alt. 1</b>	<b>Alt. 2</b>	<b>Alt. 3</b>	<b>Alt. 4</b>	<b>Alt. 5</b>	<b>Alt. 6</b>	<b>Alt. 7</b>
<b>GWh</b>	189,93	188,44	167,27	191,69	174,50	190,71	144,49
<b>Mill.NOK</b>	46,21	47,85	42,06	48,71	43,95	48,45	36,01

I Figur 21 er inntening delt på produksjon utført for alle alternativ. Grunnen til at Alternativ 1. er såpass låg er at den følgjer den hydrologiske dataserien og kan ikkje forskyve produksjon til høgare prisar. Sannsynlegvis mistar alternativ 1. også meir vatn i flaumperiodar.



**Figur 21: Inntening i NOK pr GWh**

Frå Tabell 8 er det tre alternativ, *Alternativ 3.*, *Alternativ 5.* og *Alternativ 7.* som skil seg ut, spesielt på produksjon, og er skilt ut til eigen tabell: Tabell 9. Dette er alternativa med auka regulering. Det var forventa at dei tre alternativa ville komme dårleg ut sidan desse har det utvida operasjonsområdet forklart i kapittel 2.3.6. Sjølv om dei kan operere på eit høgare område, samt har større magasin, så er rett og slett verknadsgrada så låg at det gjev liten effekt. Forklart med andre ord, så er hastigheita til vasstrålen inn på løpehjulet så lita at det brukast opp vatn ved dårleg verknadsgrad.

**Tabell 9: Tre alternativ som skiller seg ut**

	<b>Alt. 3</b>	<b>Alt. 5</b>	<b>Alt. 7</b>
<b>GWh</b>	167,27	174,50	144,49
<b>Mill.NOK</b>	42,06	43,95	36,01

Kostnaden for tunnelsystemet er likt for dei respektive med og utan regulering. Sidan alternativa i Tabell 9 gav dårlegare resultat og vil ha same kostnadsgrunnlag som sine liknande alternativ (med normal regulering), vil ikkje desse kommenterast vidare. Tabell 10 gjentek dei fire alternativa som er aktuelle å sjå nærare på.

**Tabell 10: Aktuelle alternativ og sjå vidare på.**

	<b>Alt. 1</b>	<b>Alt. 2</b>	<b>Alt. 4</b>	<b>Alt. 6</b>
<b>GWh</b>	189,93	188,44	191,69	190,71
<b>Mill.NOK</b>	46,21	47,85	48,71	48,45

Alternativa i Tabell 10 som står att er alternativ utan regulering (Alt. 1), «Dagens løysing» (Alt. 2), «Bergrom (vertikal sjakt)» (Alt. 4) og «Skråttunnel» (Alt. 6). Gjeve operasjonsnivået forklart over, så er dette noko som også vil vidare underestimere produksjonen for alternativa med regulering. Kostnadar inkluderast i vidare vurderingar og er gjeve i Tabell 11.

**Tabell 11: Kostnadar for alternativa**

	<b>Alternativ 1</b>	<b>Alternativ 2</b>	<b>Alternativ 4</b>	<b>Alternativ 6</b>
<b>Mill.NOK</b>	232,04	232,04	158,88	257,26

Alternativ 1. og Alternativ 2. har akkurat same utforming og dermed like kostnadar. Her skil Alternativ 4. seg ut med ein betydeleg lågare pris. Alternativ 4. har erstatta litt av tunnel med bergrom. Det er billigare å sprengje ut eit stort volum enn det er å drive ein tunnel med eit spesifikt «kutt» (form på tunnel) som visast igjen i Alternativ 4.

**Tabell 12: Inntektstal for samanlikning**

	<b>Alternativ 1</b>	<b>Alternativ 2</b>	<b>Alternativ 4</b>	<b>Alternativ 6</b>
<b>Høgast inntening i NOK pr time</b>	39 297,99	74 705,78	79 960,39	80 166,85
<b>Lågast inntening i NOK pr time</b>	247,68	124,39	124,39	124,39

I Tabell 12 er nokre interessante tal vist som underbygger fordelene med magasin. Det visast tydeleg at utan regulering kan ikkje produksjonen forskyvast til dei timane det er høge straumprisar. Ikkje uventa har Alternativ 4. (Bergrom m/vertikal sjakt) eit høgare



potensiale sidan den har kortare vei til turbin (mindre falltap). Grunnen til at Alternativ 6. (Skråttunnel) ligg over Alternativ 4. er at den har ein halv meter høgare fallhøgde.

For dette prosjektet vil Alternativ 1. og 2. være mest aktuelt, dette på grunnlag av område sin kontur i Grindsdalen og Henjadalen. Dei alternative som hadde bergrom og skråttunnel hadde ikkje vært fysisk mogleg å bygge slik som dei er i Excel-modellen. Dette er på grunn av lokale forhold, eksempelvis kontur i området. Det som kjem klart fram er at eit magasin vil ha stor nytteverdi for produksjon. Tunnel må byggast uansett, så mykje av kostnaden ligger i den. Moglegheit for flaumdemping er også ein viktig del når det er snakk om korttids magasin.

Ein annan del som var interessant og lærerikt frå oppgåva, var kor stort reguleringsområde, i høgde, ein Pelton turbin kan operere i. Trekker her fram som ein generell forenkla likning:

$$H_{n,LRV} = \frac{H_{n,HRV}}{4}$$

## 4 Diskusjon

Det finst lite litteratur om konseptet tunnelmagasin. Dette gjorde det vanskelig å finne informasjon som kunne ha vært nyttig å ha med i oppgåva. Som nemnt tidlegare, forskast det på underjordisk pumpekraft som kan «overførast» til dette konseptet.

Modellen er i seg sjølv god, men har svakheitar nemnt tidlegare. Det kan være tenleg å sjå på gode finurlege løysingar for korleis ein skal prioritere vatn. Når straumprisane strekk seg frå 5 til 1003 NOK/MWh så er det tydeleg at det ikkje kan brukast éin verdi som referanse og systemet må lagast meir dynamisk.

Sjølv om Sogndalsvatn vart valt som målestasjon til skalering betyr ikkje det at Nessedalselva var eit mindre godt val. Den skarpere effekten ville også vært interessant å sett med omsyn på flaumtap. Det kan tenkast at Nessedalselva ville hatt fleire og større flaumsituasjonar og dermed ville ikkje magasinet kunne «fange» dette vatnet før det vert spilt. Dette kunne mogleg ha gjeve ei tilnærma lik mengde vatn og eit anna syn på korleis magasindelen ville ha blitt nytta som flaumdemping.

Ein slik modell der ein tømme og fyller magasinet så hyppig burde det også sjåast på hastigheita av vatn (trykkstøt) i tunnel.

# Bibliografi

ANDRITZ HYDRO GmbH, 2018. *Turbine Range*, s.l.: ANDRITZ HYDRO GmbH.

Bachke, D., Fladen, B. & Holmqvist, E., 2010. *Veileder i planlegging, bygging og drift av små kraftverk*, 0301 Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat .

Bakken, T. H., u.d. *Cedren*. [Internett]

Available at: [https://www.cedren.no/Portals/Cedren/Del\\_2\\_Bakken\\_1.pdf](https://www.cedren.no/Portals/Cedren/Del_2_Bakken_1.pdf)

[Funnet 4 Juni 2019].

First, R., 2015. *Pelton and Turgo turbines*. [Kunst] (Renewables First).

Hoffmann, M. M., 2018. *CFD-simulations of damping processes of different reservoir designs for underground pumped hydroelectric storage*. Aachen: Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, RWTH Aachen University.

Jain, S. V. & Patel, R. N., 2013. *Performance characteristics of different turbines and PAT*. [Kunst] (Nirma University).

Kahfi, 2010. *Pelton theory*. [Kunst].

Killingtveit, Å. & Sælthun, N. R., 1995. *Hydrology*. 7034 Trondheim: Norwegian Institute of Tecnology Division of Hydraulic Engineering.

Kirkhorn, T., 2010. *Sognekraft*. [Internett]

Available at: <https://www.sognekraft.no/wp-content/uploads/2015/03/kuleikangertilleggsutgreiinghydrologi.pdf>

[Funnet 6 Juli 2019].

Kjølle, A., 2007. *Veileder i kvalitetssikring av små vannturbiner*, 0301 Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.

Nilsen, B., 2016. *Bergmekanikk*. [Internett]

Available at: <https://bergmekanikk.no/wp-content/uploads/2016/05/4.-Svakhetssoner-i-norske-tunneler---forekomst-karakter-og-egenskaper-Bjorn-Nilsen.pdf>

[Funnet 3 Juli 2019].

Nilsen, B. & Thidemann, A., 1993. *Rock Engineering*. 7034: Norwegian Institute of Technology, Division of Hydraulic Engineering.

Nord Pool ASA, 2015-2018. *Elspot prices hourly*, s.l.: Nord Pool.

Nord Pool ASA, u.å. *Nord Pool Group*. [Internett]

Available at: <https://www.nordpoolgroup.com>

[Funnet 21 Mai 2019].

NTH, 1995. *NTH-Anleggsdrift*. [Kunst] (NTH).

NVE, 2019. *Atlas*. [Kunst] (NVE).

NVE, 2019. *Målestasjoner med sanntids-vannføring*. [Internett]  
Available at: <https://www2.nve.no/h/hd/plotreal/Q/index.html>  
[Funnet Mai 2019].

NVE, 2019. *NEVINA*, s.l.: NVE.

NVE, 2019. *NVE Nevina*. [Internett]  
Available at: <http://nevina.nve.no>  
[Funnet 3 Mai 2019].

NVE, 2019. *xGeo.no*, s.l.: s.n.

Powel, u.d. *Powel*. [Internett]  
Available at: <https://www.powel.com/globalassets/product-information/smart-energy/optimal-midterm-fs.pdf>  
[Funnet 29 Mai 2019].

Quaschnig, V., 2015. *Efficiency chart*. [Kunst] (University of Strathclyde).

Richter, W., Knoblauch, H. & Zenz, G., 2016. *SURGE TANK DESIGN FOR STORAGE-TUNNELS*, A-8020 Graz: Graz University of Technology: Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management.

Sintef, 2014. *SINTEF*. [Internett]  
Available at: <https://www.sintef.no/prosjekter/samkjoeringsmodellen/>  
[Funnet 29 Mai 2019].

Sintef, u.d. *SINTEF*. [Internett]  
Available at: <https://www.sintef.no/programvare/vansimtap/>  
[Funnet 29 Mai 2019].

Sintef, u.d. *SINTEF*. [Internett]  
Available at: <https://www.sintef.no/programvare/prodrisk/>  
[Funnet 29 Mai 2019].

Sintef, u.d. *SINTEF*. [Internett]  
Available at: <https://www.sintef.no/programvare/shop/>  
[Funnet 29 Mai 2019].

Sintef, u.d. *SINTEF*. [Internett]  
Available at: <https://www.sintef.no/programvare/sharm/>  
[Funnet 29 Mai 2019].

Sognekraft, 2009. *Sognekraft*. [Internett]  
Available at: <https://www.sognekraft.no/wp-content/uploads/2015/10/20090127leikangerkraftverkkonsesjonsoknadkompr002.pdf>  
[Funnet 19 Mai 2019].

Stensby, K. E., 2016. *Kostnadsgrunnlag for vannkraft*, 0301 Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.

Tveit, J., 1994. *Ingeniørhydrologi - bind 1*. 7030: Institutt for vassbygging, UNIT.

Wickenhäuser, M., 2008. *Zweiphasenströmung in Entlüftungssystemen von Druckstollen*. CH-8092 Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich.

Widmann, W. & Roner, M., 2013. *Stanzertal hydro plant: Moving forward with a sustainable community and utility partnership*, A-6020 Innsbruck: INFRA Project Development GmbH.

# Vedlegg

**Vedlegg 1:** Nevina datablad

**Vedlegg 2:** Excel utklipp

**Vedlegg 3:** Makroar

# VEDLEGG 1



## Lavvannskart

Vassdragsnr.: 077.6Z  
 Kommune: Lekanger  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Grindselvi

Feltparametere	
Areal (A)	1,6 km <sup>2</sup>
Effektiv sjø (S <sub>eff</sub> )	0,4 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	2,6 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	159,8 m/km
Elvegradient <sub>1005</sub> (G <sub>1005</sub> )	135,7 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	2,1 km
H <sub>min</sub>	598 moh.
H <sub>10</sub>	777 moh.
H <sub>20</sub>	826 moh.
H <sub>30</sub>	849 moh.
H <sub>40</sub>	883 moh.
H <sub>50</sub>	923 moh.
H <sub>60</sub>	936 moh.
H <sub>70</sub>	947 moh.
H <sub>80</sub>	969 moh.
H <sub>90</sub>	1057 moh.
H <sub>max</sub>	1153 moh.
Bre	0,0 %
Dyrket mark	0,0 %
Myr	0,3 %
Sjø	2,1 %
Skog	5,3 %
Snaufjell	92,2 %
Urban	0,0 %

### Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	55,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	1,9 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	1,9 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	5,7 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	1,5 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	24,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,4

### Klima

Klimaregion	Vest
Årsnedbør	1235 mm
Sommernedbør	431 mm
Vintemedbør	804 mm
Årstemperatur	3,1 °C
Sommertemperatur	7,6 °C
Vintertemperatur	-0,2 °C
Temperatur Juli	9,5 °C
Temperatur August	9,4 °C



Kartbakgrunn: Statens Kartverk  
 Kartdatum: EUREF89 WGS84  
 Prosjeksjon: UTM 33N

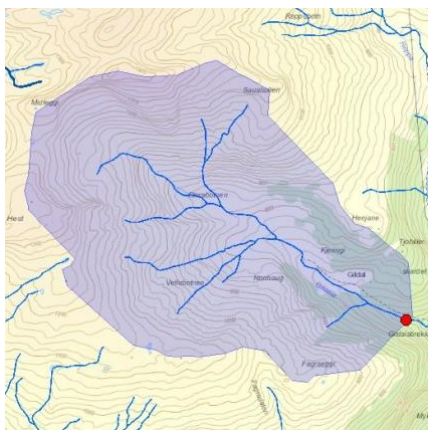
Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

1) Venden er editert

© nevina.nve.no



## Lavvannskart

Vassdragsnr.: 077.6Z  
 Kommune: Lekanger  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Grindselvi

Feltparametere	
Areal (A)	5,3 km <sup>2</sup>
Effektiv sjø (S <sub>eff</sub> )	0,0 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	3,1 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	169,4 m/km
Elvegradient <sub>1005</sub> (G <sub>1005</sub> )	148,6 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	3,4 km
H <sub>min</sub>	607 moh.
H <sub>10</sub>	755 moh.
H <sub>20</sub>	822 moh.
H <sub>30</sub>	878 moh.
H <sub>40</sub>	947 moh.
H <sub>50</sub>	1006 moh.
H <sub>60</sub>	1074 moh.
H <sub>70</sub>	1126 moh.
H <sub>80</sub>	1184 moh.
H <sub>90</sub>	1258 moh.
H <sub>max</sub>	1418 moh.
Bre	0,0 %
Dyrket mark	0,0 %
Myr	0,0 %
Sjø	12,5 %
Skog	85,9 %
Snaufjell	0,0 %
Urban	0,0 %

### Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	63,7 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	2,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	2,3 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	12,0 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	1,9 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	26,8 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,4

### Klima

Klimaregion	Vest
Årsnedbør	1300 mm
Sommernedbør	444 mm
Vintemedbør	856 mm
Årstemperatur	2,8 °C
Sommertemperatur	7,3 °C
Vintertemperatur	-0,4 °C
Temperatur Juli	9,1 °C
Temperatur August	9,1 °C



Kartbakgrunn: Statens Kartverk  
 Kartdatum: EUREF89 WGS84  
 Prosjeksjon: UTM 33N

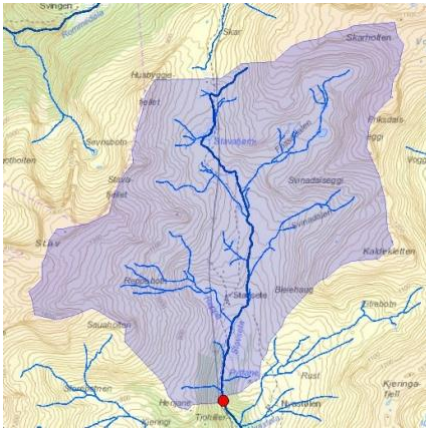
Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

1) Venden er editert

© nevina.nve.no



Kartbakgrunn: Statens Kartverk

Kartdatum: EUREF89 WGS84

Projeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

### Lavvannskart

Vassdragsnr.: 077.GZ  
 Kommune: Leikanger  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Grindselvi

Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	79,8 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	3,1 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	3,2 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	14,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	2,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	31,9 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,4

Klima

Klimaregion	Vest
Årsnedbør	1411 mm
Sommernedbør	472 mm
Vinternedbør	939 mm
Årstemperatur	2,0 °C
Sommertemperatur	6,3 °C
Vintertemperatur	-1,1 °C
Temperatur Juli	8,1 °C
Temperatur August	8,1 °C

Feltparametere

Areal (A)	14,1 km <sup>2</sup>
Effektiv sø (S <sub>eff</sub> )	0,0 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	5,4 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	97,8 m/km
Elvegradient <sub>bas</sub> (G <sub>bas</sub> )	83,8 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	5,4 km
H <sub>min</sub>	605 moh.
H <sub>70</sub>	821 moh.
H <sub>80</sub>	893 moh.
H <sub>90</sub>	969 moh.
H <sub>60</sub>	1020 moh.
H <sub>50</sub>	1069 moh.
H <sub>40</sub>	1118 moh.
H <sub>30</sub>	1173 moh.
H <sub>20</sub>	1233 moh.
H <sub>10</sub>	1316 moh.
H <sub>max</sub>	1533 moh.
Bre	0,0 %
Dyrket mark	0,0 %
Myr	0,6 %
Sjø	0,2 %
Skog	2,1 %
Snau fjell	96,3 %
Urban	0,0 %

<sup>1)</sup> Verdien er editert

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

© nevina.nve.no



Kartbakgrunn: Statens Kartverk

Kartdatum: EUREF89 WGS84

Projeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

### Lavvannskart

Vassdragsnr.: 077.GZ  
 Kommune: Leikanger  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Grindselvi

Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	77,0 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	2,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	2,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	11,3 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	2,1 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	31,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,4

Klima

Klimaregion	Vest
Årsnedbør	1401 mm
Sommernedbør	464 mm
Vinternedbør	937 mm
Årstemperatur	1,9 °C
Sommertemperatur	6,2 °C
Vintertemperatur	-1,1 °C
Temperatur Juli	8,1 °C
Temperatur August	8,1 °C

Feltparametere

Areal (A)	3,3 km <sup>2</sup>
Effektiv sø (S <sub>eff</sub> )	0,0 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	3,3 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	145,4 m/km
Elvegradient <sub>bas</sub> (G <sub>bas</sub> )	123,5 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	3,2 km
H <sub>min</sub>	600 moh.
H <sub>70</sub>	782 moh.
H <sub>80</sub>	847 moh.
H <sub>90</sub>	912 moh.
H <sub>60</sub>	956 moh.
H <sub>50</sub>	1013 moh.
H <sub>40</sub>	1067 moh.
H <sub>30</sub>	1114 moh.
H <sub>20</sub>	1168 moh.
H <sub>10</sub>	1234 moh.
H <sub>max</sub>	1314 moh.
Bre	0,0 %
Dyrket mark	0,0 %
Myr	0,5 %
Sjø	0,0 %
Skog	0,5 %
Snau fjell	97,4 %
Urban	0,0 %

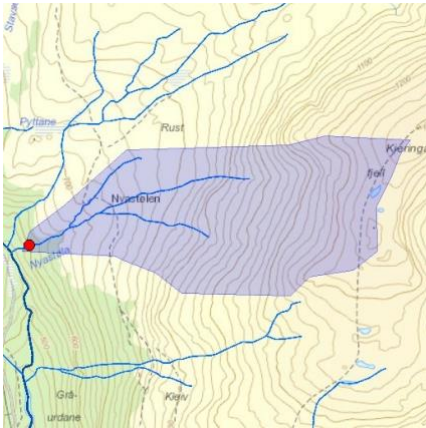
<sup>1)</sup> Verdien er editert

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

© nevina.nve.no





### Lavvannskart

Vassdragsnr.: 077.GZ  
 Kommune: Leikanger  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Grindselvi

#### Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	69,8 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	2,2 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	1,9 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	16,8 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	1,9 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	32,1 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,5

#### Klima

Klimaregion	Vest
Årsnedbør	1346 mm
Sommernedbør	451 mm
Vinternedbør	896 mm
Årstemperatur	1,5 °C
Sommertemperatur	5,6 °C
Vintertemperatur	-1,5 °C
Temperatur Juli	7,5 °C
Temperatur August	7,5 °C

#### Feltparametere

Areal (A)	1,2 km <sup>2</sup>
Effektiv sjo (S <sub>eff</sub> )	0,0 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	1,3 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	277,4 m/km
Elvegradient <sub>bas</sub> (G <sub>bas</sub> )	224,7 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	2,1 km
H <sub>min</sub>	590 moh.
H <sub>70</sub>	723 moh.
H <sub>80</sub>	772 moh.
H <sub>90</sub>	820 moh.
H <sub>60</sub>	898 moh.
H <sub>50</sub>	965 moh.
H <sub>40</sub>	1028 moh.
H <sub>30</sub>	1100 moh.
H <sub>20</sub>	1166 moh.
H <sub>10</sub>	1227 moh.
H <sub>max</sub>	1293 moh.
Bre	0,0 %
Dyrket mark	0,0 %
Myr	0,0 %
Sjo	0,1 %
Skog	1,6 %
Snau fjell	90,8 %
Urban	0,0 %

1) Verdien er editert



Kartbakgrunn: Statens Kartverk

Kartdatum: EUREF89 WGS84

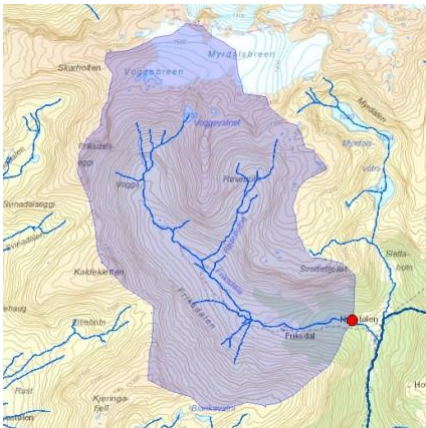
Projeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

© nevina.nve.no



### Lavvannskart

Vassdragsnr.: 077.SZ  
 Kommune: Leikanger  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Henjelvi

#### Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	80,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	1,8 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	1,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	22,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	0,8 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	40,2 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,5

#### Klima

Klimaregion	Bre-Sør
Årsnedbør	1460 mm
Sommernedbør	485 mm
Vinternedbør	974 mm
Årstemperatur	2,1 °C
Sommertemperatur	6,5 °C
Vintertemperatur	-1,1 °C
Temperatur Juli	8,4 °C
Temperatur August	8,3 °C

#### Feltparametere

Areal (A)	13,3 km <sup>2</sup>
Effektiv sjo (S <sub>eff</sub> )	0,0 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	5,5 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	117,0 m/km
Elvegradient <sub>bas</sub> (G <sub>bas</sub> )	75,2 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	5,0 km
H <sub>min</sub>	606 moh.
H <sub>70</sub>	776 moh.
H <sub>80</sub>	852 moh.
H <sub>90</sub>	930 moh.
H <sub>60</sub>	1015 moh.
H <sub>50</sub>	1078 moh.
H <sub>40</sub>	1133 moh.
H <sub>30</sub>	1212 moh.
H <sub>20</sub>	1295 moh.
H <sub>10</sub>	1423 moh.
H <sub>max</sub>	1563 moh.
Bre	5,4 %
Dyrket mark	0,0 %
Myr	0,7 %
Sjo	0,5 %
Skog	5,9 %
Snau fjell	83,6 %
Urban	0,0 %

1) Verdien er editert



Kartbakgrunn: Statens Kartverk

Kartdatum: EUREF89 WGS84

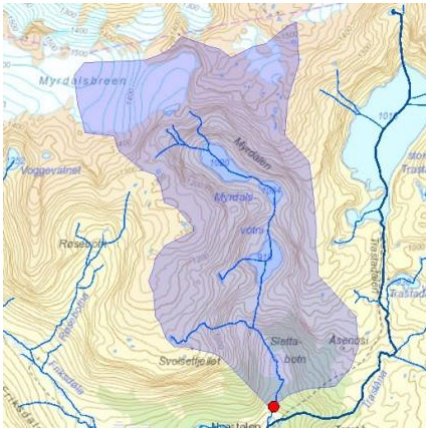
Projeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

© nevina.nve.no



Kartbakgrunn: Statens Kartverk  
 Kartdatum: EUREF89 WGS84  
 Prosjeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

### Lavvannskart

Vassdragsnr.: 077.SZ  
 Kommune: Leikanger  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Henjelvi

#### Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	85,0 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	2,3 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	2,1 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	20,1 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	1,0 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	45,9 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,5

#### Klima

Klimaregion	Bre-Sor
Årsnedbør	1481 mm
Sommernedbør	495 mm
Vinternedbør	986 mm
Årstemperatur	1,5 °C
Sommertemperatur	5,7 °C
Vintertemperatur	-1,6 °C
Temperatur Juli	7,6 °C
Temperatur August	7,6 °C

#### Feltparametere

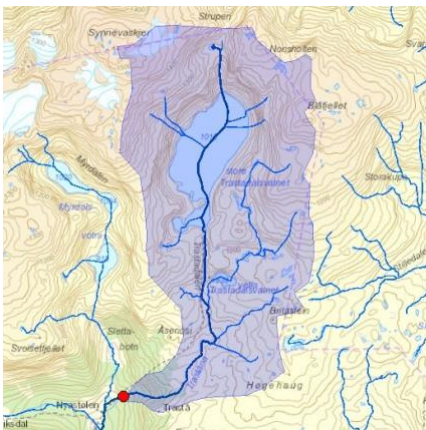
Areal (A)	6,6 km <sup>2</sup>
Effektivt sjø (S <sub>eff</sub> )	2,1 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	4,0 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	162,9 m/km
Elvegradient <sub>0,05</sub> (G <sub>0,05</sub> )	122,0 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	4,2 km
H <sub>min</sub>	608 moh.
H <sub>70</sub>	847 moh.
H <sub>80</sub>	944 moh.
H <sub>90</sub>	1020 moh.
H <sub>60</sub>	1081 moh.
H <sub>50</sub>	1148 moh.
H <sub>40</sub>	1226 moh.
H <sub>30</sub>	1298 moh.
H <sub>20</sub>	1379 moh.
H <sub>10</sub>	1429 moh.
H <sub>max</sub>	1538 moh.
Bre	13,3 %
Dyrket mark	0,0 %
Myr	0,2 %
Sjø	3,8 %
Skog	7,7 %
Snaufjell	72,9 %
Urban	0,0 %

<sup>1)</sup> Verdien er editert

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

© nevina.nve.no



Kartbakgrunn: Statens Kartverk  
 Kartdatum: EUREF89 WGS84  
 Prosjeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

### Lavvannskart

Vassdragsnr.: 077.SZ  
 Kommune: Leikanger  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Henjelvi

#### Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	76,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	6,3 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	6,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	26,1 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	5,3 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	38,3 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,5

#### Klima

Klimaregion	Vest
Årsnedbør	1440 mm
Sommernedbør	486 mm
Vinternedbør	954 mm
Årstemperatur	1,3 °C
Sommertemperatur	5,5 °C
Vintertemperatur	-1,7 °C
Temperatur Juli	7,4 °C
Temperatur August	7,4 °C

#### Feltparametere

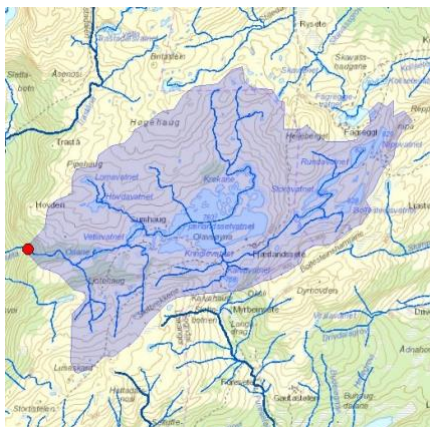
Areal (A)	8,6 km <sup>2</sup>
Effektivt sjø (S <sub>eff</sub> )	5,2 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	5,7 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	108,9 m/km
Elvegradient <sub>0,05</sub> (G <sub>0,05</sub> )	52,2 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	4,8 km
H <sub>min</sub>	601 moh.
H <sub>70</sub>	898 moh.
H <sub>80</sub>	966 moh.
H <sub>90</sub>	1013 moh.
H <sub>60</sub>	1016 moh.
H <sub>50</sub>	1061 moh.
H <sub>40</sub>	1113 moh.
H <sub>30</sub>	1202 moh.
H <sub>20</sub>	1283 moh.
H <sub>10</sub>	1354 moh.
H <sub>max</sub>	1538 moh.
Bre	1,2 %
Dyrket mark	0,0 %
Myr	0,0 %
Sjø	11,0 %
Skog	2,7 %
Snaufjell	85,1 %
Urban	0,0 %

<sup>1)</sup> Verdien er editert

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

© nevina.nve.no



### Lavannskart

Vassdragsnr.: 077.SZ  
 Kommune: Leikanger  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Henjelvi

#### Feltparametere

Areal (A)	11,0 km <sup>2</sup>
Effektiv sjo (S <sub>eff</sub> )	5,4 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	7,0 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	32,7 m/km
Elvegradient <sub>bas</sub> (G <sub>bas</sub> )	17,2 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	5,6 km
H <sub>min</sub>	594 moh.
H <sub>70</sub>	763 moh.
H <sub>80</sub>	771 moh.
H <sub>90</sub>	789 moh.
H <sub>60</sub>	819 moh.
H <sub>50</sub>	833 moh.
H <sub>40</sub>	846 moh.
H <sub>30</sub>	862 moh.
H <sub>20</sub>	886 moh.
H <sub>10</sub>	913 moh.
H <sub>max</sub>	998 moh.
Bre	0,0 %
Dyrket mark	0,0 %
Myr	4,2 %
Sjo	11,2 %
Skog	5,9 %
Snau fjell	66,7 %
Urban	0,0 %

Vannføringsindeks, se merknader	
Middelvannføring (61-90)	49,2 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	2,5 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	2,5 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	3,1 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	1,8 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	20,7 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,4

Klima	
Klimaregion	Vest
Årsnedbør	1217 mm
Sommernedbør	420 mm
Vinternedbør	797 mm
Årstemperatur	2,8 °C
Sommertemperatur	7,6 °C
Vintertemperatur	-0,7 °C
Temperatur Juli	9,5 °C
Temperatur August	9,3 °C



Kartbakgrunn: Statens Kartverk

Kartdatum: EUREF89 WGS84

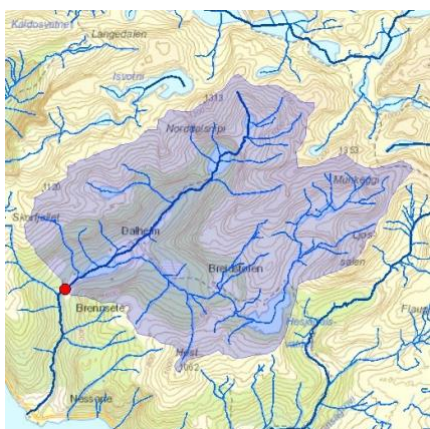
Projeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

© nevina.nve.no



### Lavannskart

Vassdragsnr.: 079.4Z  
 Kommune: Balestrand  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Nesselvi

#### Feltparametere

Areal (A)	30,2 km <sup>2</sup>
Effektiv sjo (S <sub>eff</sub> )	1,3 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	6,8 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	111,0 m/km
Elvegradient <sub>bas</sub> (G <sub>bas</sub> )	97,5 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	8,0 km
H <sub>min</sub>	290 moh.
H <sub>70</sub>	431 moh.
H <sub>80</sub>	574 moh.
H <sub>90</sub>	691 moh.
H <sub>60</sub>	756 moh.
H <sub>50</sub>	817 moh.
H <sub>40</sub>	884 moh.
H <sub>30</sub>	946 moh.
H <sub>20</sub>	1038 moh.
H <sub>10</sub>	1128 moh.
H <sub>max</sub>	1346 moh.
Bre	0,0 %
Dyrket mark	0,4 %
Myr	0,4 %
Sjo	4,1 %
Skog	26,5 %
Snau fjell	66,7 %
Urban	0,0 %

Vannføringsindeks, se merknader	
Middelvannføring (61-90)	64,3 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	3,1 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	3,2 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	10,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	2,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	26,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,4

Klima	
Klimaregion	Vest
Årsnedbør	1600 mm
Sommernedbør	551 mm
Vinternedbør	1049 mm
Årstemperatur	3,3 °C
Sommertemperatur	7,6 °C
Vintertemperatur	0,2 °C
Temperatur Juli	9,3 °C
Temperatur August	9,4 °C



Kartbakgrunn: Statens Kartverk

Kartdatum: EUREF89 WGS84

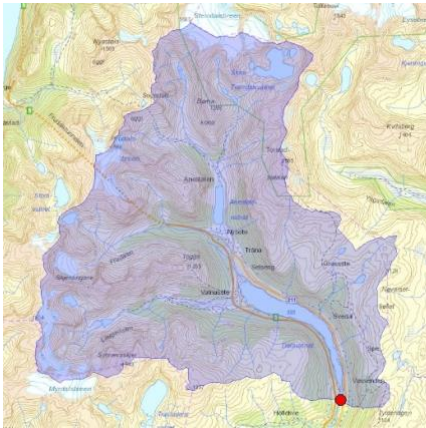
Projeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.

© nevina.nve.no



## Lavvannskart

Vassdragsnr.: 077.3B  
 Kommune: Sogndal  
 Fylke: Sogn og Fjordane  
 Vassdrag: Sogndalselvi

### Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	77,7 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	5,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	4,3 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	85,2 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	5,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	43,5 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,6

### Klima

Klimaregion	Vest
Årsnedbør	1611 mm
Sommernedbør	556 mm
Vinternedbør	1055 mm
Årstemperatur	1,5 °C
Sommertemperatur	6,3 °C
Vintertemperatur	-2,0 °C
Temperatur Juli	8,3 °C
Temperatur August	8,4 °C

### Feltparametere

Areal (A)	112,1 km <sup>2</sup>
Effektivt sjø (S <sub>eff</sub> )	2,3 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	1,6 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	283,8 m/km
Elvegradient <sub>bas</sub> (G <sub>bas</sub> )	320,7 m/km
Feltlengde(F <sub>L</sub> )	14,7 km
H <sub>min</sub>	395 moh.
H <sub>70</sub>	494 moh.
H <sub>50</sub>	658 moh.
H <sub>30</sub>	786 moh.
H <sub>20</sub>	897 moh.
H <sub>10</sub>	998 moh.
H <sub>60</sub>	1092 moh.
H <sub>70</sub>	1195 moh.
H <sub>80</sub>	1284 moh.
H <sub>90</sub>	1402 moh.
H <sub>max</sub>	1606 moh.
Bre	3,9 %
Dyrket mark	1,3 %
Myr	1,4 %
Sjø	4,1 %
Skog	20,9 %
Snau fjell	60,4 %
Urban	0,0 %

1) Verdien er editert



Kartbakgrunn: Statens Kartverk

Kartdatum: EUREF89 WGS84  
 Prosjeksjon: UTM 33N

Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannindekser. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrvårsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.



### VEDLEGG 3

#### «Makro 1»

```
Sub DagligTilsig()  
  
k = 19  
For i = 5 To 2195  
Sheets("V.B.Makro (2)").Cells(k, 4) = Sheets("Hydr.data PIVOT").Cells(i,  
26)  
k = k + 24  
  
Next  
  
End Sub
```

#### «Makro 2»

```
Sub Sortere()  
Dim Copyrange As String  
Dim Copyrange2 As String  
N = 2191  
k = 4  
For i = 1 To N  
    Start1 = k  
    End1 = Start1 + 23  
    Sheets("El.Pris").Select  
    Let Copyrange = "B" & Start1 & ":" & "C" & End1  
    Range(Copyrange).Select  
    Selection.Copy  
    Sheets("mellomrekning").Select  
    Range("A20").Select  
    ActiveSheet.Paste  
    Range("B20:B43").Select  
    ActiveWorkbook.Worksheets("mellomrekning").Sort.SortFields.Clear  
    ActiveWorkbook.Worksheets("mellomrekning").Sort.SortFields.Add2  
Key:=Range("B20"), _  
    SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlDescending, DataOption:=xlSortNormal  
    With ActiveWorkbook.Worksheets("mellomrekning").Sort  
        .SetRange Range("A20:B43")  
        .Header = xlNo  
        .MatchCase = False  
        .Orientation = xlTopToBottom  
        .SortMethod = xlPinYin  
        .Apply  
    End With  
  
    Range("A20:B43").Select  
    Selection.Copy  
    Sheets("V.B.Makro (2)").Select  
    Let Copyrange2 = "E" & k + 5  
    Range(Copyrange2).Select  
    ActiveSheet.Paste  
  
    k = k + 24  
  
Next  
  
End Sub
```

