



Forord

Denne oppgaven avslutter mitt femårige masterstudie i Miljøfysikk og fornybar energi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) i Ås. Masteroppgaven teller 30 studiepoeng og er skrevet ved Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT). Oppgaven ble skrevet på oppfordring av min veileder ved universitetet, Førsteamanuensis Petter H. Heyerdahl, og var opprinnelig idéen til min medstudent Ole Anders Vandsemb.

Opgaven har gitt både glede og frustrasjon gjennom disse fem arbeidsintensive månedene, og har vekket overraskende mye oppmerksomhet fra omverdenen. Oppgaven har ført til spennende diskusjoner både på hjemmefronten, med medelever ved NMBU og mennesker i forskjellige industrier både i Norge og utlandet. Dette har gjort det ekstra motiverende å arbeide mot det ferdige produktet.

Jeg vil først å fremst takke min veileder ved NMBU, Petter H. Heyerdahl, for god veiledning og det store engasjementet han har vist for oppgaven. Deretter vil jeg rette en takk til Sean Erik Foss ved Institutt for energiteknikk (IFE) for videre veiledning på oppgaven, Jan Kåre Bøe for hjelp med bakgrunnsstoff for traktorer og Ole Anders Vandsemb for at jeg fikk jobbe videre med hans idé. Utover dette vil jeg også rette en takk til ansatte ved IFE, HYSTORSYS, bondelagene og bøndene som har hjulpet meg med å finne informasjon jeg har hatt behov for underveis i arbeidet. Takk til Anniken Urianstad for korrekturlesing av oppgaven, og alle andre inspirerende mennesker jeg har vært i kontakt med i forbindelse med denne oppgaven.

Helt til slutt vil jeg også benytte anledningen til å takke både medelever og professorer ved NMBU for de fem flotte årene jeg har hatt i Ås. Jeg har gjennom disse årene fått mange uforglemmelige minner, utviklet meg som menneske og lært utrolig mye.

Ås, 12.05.2015

Heidi Urianstad Alve

Sammendrag

Formålet med oppgaven er å beregne hvor store jorder som kan driftes med elektriske traktorer ved hjelp av den elektriske energien produsert av et fotovoltaisk anlegg (PV-anlegg) på låvetaket til en gård.

Første del oppgaven beregner virkningsgrad, effekt- og energiflyt for traktoren. Beregningene er gjort for to alternative elektriske traktorer, henholdsvis en batteridrevet og en hydrogendrevet traktor. Grunndataene for analysene hentes fra en konvensjonell dieseltraktors bruksmønster og dieselforbruk. Ut fra disse dataene beregnes energi- og effektbruk i de to elektriske traktorene, samt virkningsgraden deres.

Videre tar oppgaven for seg effektflyt, virkningsgrad og produksjon i PV-anlegget, ladestasjonen og hydrogenproduksjonsstasjonen. Det er brukt genererte data og simuleringsprogramvaren PVsyst til enkle simuleringer for produksjon av elektrisk energi fra PV-anlegget på låvetaket. Simuleringene er gjort for fire områder i Norge, og for både nord-/sørvendte og øst-/vestvendte låver for hvert av områdene. Områdene det er sett på i denne oppgaven er Balsfjord (Troms), Verdal (Nord-Trøndelag), Sola (Rogaland) og Ås (Akershus). Det er også gjort enkle analyser for konsekvensene av skyggelegging på modulene, samt bruken av ulike typer vekselrettere.

I siste del av oppgaven er det gjort analyser for å finne hvor store jorder som kan driftes av de elektriske traktorene med energien produsert i PV-anlegget. I denne delen settes forbruket til de elektriske traktorene opp mot produksjonen fra PV-anlegget. Det er gjort tre analyser for hvert av områdene, Balsfjord, Verdal, Sola og Ås. De to første analysene er for den batteridrevne traktoren, hvor det er satt opp årlig og månedlig energibalanse. Den siste analysen er gjort for den hydrogendrevne traktoren, hvor årlig produksjon er satt opp mot årlig forbruk av hydrogen. Oppgaven avsluttes av en kort analyse av Well-to-wheel (WTW) virkningsgradene til de ulike systemene med traktorer, PV-anlegg, nett og diesel.

Oppgaven konkluderer med at med energien fra PV-anlegget kan en elektrisk traktor drifte et jordbruksareal som er større enn de fleste av jordbrukene som finnes i de fire områdene det er sett på i denne oppgaven. Ved å drifte jordbruksarealer som er mindre enn arealene funnet i denne oppgaven blir det et overskudd av elektrisk energi fra PV-anlegget. Dette åpner for muligheten til å bruke overskuddet av elektrisk energi til andre formål ved gården, peak-shaving eller til å redusere anleggsstørrelsen. En oversikt over arealene som kan driftes er vist i tabellen under.

Plassering av jordbruk	Areal batteritraktor (årlig)	Areal batteritraktor (månedlig)	Areal hydrogentraktor (årlig)
Balsfjord	540 – 900 daa	130 – 140 daa	74 – 120 daa
Verdal	3000 – 4700 daa	270 – 400 daa	420 – 660 daa
Sola	500 – 840 daa	230 – 270 daa	70 – 120 daa
Ås	3400 – 5600 daa	1000 – 1200 daa	480 – 780 daa

Oppgaven viser også at med dagens teknologi er det batteritraktoren som den er mest nærliggende at kan gjennomføres. Dette skyldes at lagringskapasiteten og vektprosenten til dagens hydrogentanker er lave, og at traktoren derfor ikke vil kunne brukes effektivt ute på jordene. Den batteridrevne traktoren kan med dagens teknologi brukes for de mindre energikrevende jordbruksprosessene, og er derfor egnet som en traktor nummer to. WTW-virkningsgradene til systemene med PV-anlegg og elektriske traktorer er lavere enn til dieseltraktorsystemet.

Abstract

The purpose of this thesis is to estimate the size of the agricultural area an electric tractor can operate with the energy produced by a photovoltaic system (PV system) placed on the barn roof at a farm.

The first part of the thesis calculates the efficiency, power flow and energy flow for the electric tractors. Two electric tractors are analysed: a battery tractor and a hydrogen tractor. The basis for this analysis is data for the usage patterns and fuel consumption of the conventional diesel tractor. These data are used to estimate the efficiency, energy and power consumption of each type of electric tractor.

The second part examines the power flow, efficiency and production in the PV system, charging station and hydrogen station. Simulations of the electricity production in the PV system are based on generated data and conducted with the simulation software PVsyst. The simulations are done for four different geographic areas in Norway: Balsfjord (Troms), Verdal (Nord-Trøndelag), Sola (Rogaland) and Ås (Akershus). These simulations cover barns facing both north/south and east/west in each area. Additionally, some simple analysis are done to estimate the effect of shading and usage of different types of inverters.

The last part of the thesis estimates what size of agricultural area each of the electric tractors can operate with the energy produced by the PV system. The energy and hydrogen consumption of the tractors is compared to the energy production of the PV system and hydrogen production of the hydrogen station through three types of analyses for each area. The first two analyses are done for the battery tractor, by calculating a monthly and a yearly energy balance. The last analysis is for the hydrogen tractor, and is done by a yearly balance of hydrogen production and consumption. The thesis is closed by a short analysis of the Well-to-wheel (WTW) efficiencies of the different systems with tractors, PV system, power grid and diesel.

The thesis concludes that when supplied with energy from the PV system, an electric tractor can operate an area that is larger than most of the agricultural areas in the four geographic areas. The results are shown in the table below. When the electric tractors operate a smaller agricultural area, there will be an excess of electric energy. The excess energy can be used to reduce the size of the PV system, for peak-shaving or for other purposes at the farm.

Area of agribusiness	Area battery powered tractor (yearly)	Area battery powered tractor (monthly)	Area hydrogen tractor (yearly)
Balsfjord	540 – 900 daa	130 – 140 daa	74 – 120 daa
Verdal	3000 – 4700 daa	270 – 400 daa	420 – 660 daa
Sola	500 – 840 daa	230 – 270 daa	70 – 120 daa
Ås	3400 – 5600 daa	1000 – 1200 daa	480 – 780 daa

The thesis also concludes that with today's technology, the battery-powered tractor is the more efficient of the two electric tractors. This is due to the low storage capacity and weight percent of hydrogen tanks available today. Even with the existing technology, the battery-powered tractor can be used for less energy-intensive agricultural processes, and therefore as a tractor number two. The WTW-efficiencies of the systems with both the PV system and electric tractors are found to be lower than for the diesel system.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Liste over figurer	XI
Liste over tabeller.....	XIII
Symbolliste	XV
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven.....	1
1.2 Problemstillinger og avgrensninger.....	2
1.3 Tidligere arbeid.....	3
1.3.1 Utskiftning av batterier	3
1.3.2 Elektriske og hydrogendrevne traktorer	4
1.4 Oppgavens struktur	5
2 Traktorene.....	7
2.1 Dieseltraktoren.....	7
2.1.1 Oppbygning av dieseltraktoren	7
2.1.2 Komponentene i dieseltraktoren	8
2.1.3 Effekt- og virkningsgradsberegninger	11
2.2 Batteritraktoren.....	13
2.2.1 Oppbygningen av batteritraktoren	13
2.2.2 Komponentene i batteritraktoren.....	14
2.2.3 Effekt- og virkningsgradsberegninger	16
2.2.4 Spesialtraktor: Elektrisk Nav-traktor	18
2.3 Hydrogentraktoren.....	18
2.3.1 Oppsett av hydrogentraktoren.....	18
2.3.2 Komponentene i hydrogentraktoren	19
2.3.3 Beregninger for hydrogentraktoren:.....	21
3 Solenergi, ladestasjon og hydrogenlagring	23
3.1 Solenergi.....	23
3.1.1 Simulering av solenergi i PVsyst	23
3.1.2 Informasjon om låvene det blir sett på i denne oppgaven.	23
3.1.3 Simulering av spesialtilfeller i PVsyst	27
3.1.4 Virkningsgrader i PV-anlegget	29
3.2 Ladestasjon for batterier	30
3.3 Hydrogenproduksjonsstasjon.....	31

3.4	Effekt fra nettet	32
4	Datagrunnlag	33
4.1	Datagrunnlag for dieselforbruk ved ulike jordbruksprosesser.....	33
4.2	Datagrunnlag for simulering av solenergi: Meteonorm 6.1.....	33
4.3	Datagrunnlag tidsbruk for ulike jordbruksprosesser.....	34
4.4	Datagrunnlag for jordbruksarealer.....	35
5	Helhetlig bilde.....	37
5.1	Traktorbruk.....	37
5.2	Sammenligning av energiforbruk og –produksjon	37
5.3	Sammenligning av de ulike systemene	38
6	Resultater	41
6.1	Traktorene	41
6.1.1	Dieseltraktoren.....	41
6.1.2	Batteritraktoren.....	42
6.1.3	Hydrogentraktoren.....	43
6.2	Solenergi, ladestasjon og hydrogenstasjon.....	45
6.2.1	Solenergi.....	45
6.2.2	Ladestasjon for batterier	46
6.2.3	Hydrogenproduksjonsstasjon.....	47
6.3	Helhetlig bilde.....	47
6.3.1	Balsfjord.....	47
6.3.2	Verdal	53
6.3.3	Sola	58
6.3.4	Ås.....	63
6.3.5	Sammenligning av de ulike systemene	68
7	Diskusjon	69
7.1	Traktorene	69
7.2	Solenergi, ladestasjon og hydrogenproduksjonsstasjon	72
7.3	Helhetlig bilde.....	73
7.3.1	Energi- og hydrogenbalanser i de ulike områdene	73
7.3.2	Sammenligning av de ulike systemene	77
7.4	Forslag til videre arbeider.....	78
8	Konklusjon	79
	Referanseliste.....	81
	Vedlegg.....	85
	Vedlegg 1: Forklaring på formelen for utregning av virkningsgraden til traktorhjulene	85

Vedlegg 2: Tabeller for drivstofforbruk.....	86
Vedlegg 3: Verdier for tap i PV-anlegget på grunn av snø på modulene	87
Vedlegg 4: Tapoversikt fra PVsyst for PV-anlegg i Ås.	88
Vedlegg 5: Tabeller for tidsbruk og perioder for de ulike jordbruksprosessene	89
Vedlegg 6: Jordbruksarealer.....	90

Liste over figurer

Figur 1: Oversiktsbilde over dieseltraktoren med nummerering av de ulike komponentene. Bildet er hentet fra ³⁴ og redigert.	7
Figur 2: Flytdiagram som viser effektflyten gjennom dieseltraktoren. Hentet fra ³³	8
Figur 3: Kurvediagram for dieselmotorens virkningsgrad. Viser virkningsgradens variasjon med andelen brukt dreiemoment, motorturtall og av motorens merkeeffekt. Hentet fra ³³	9
Figur 4: Kurvediagram for virkningsgraden til girkassen. Viser virkningsgradens variasjon med andelen brukt dreiemoment, motorturtall og motoreffekt. Hentet fra ³³	10
Figur 5: Graf som viser variasjonen i virkningsgraden for overføring av effekt mellom hjul og underlag. Hentet fra ³³	11
Figur 6: Oversiktsbilde over batteritraktoren, med nummerering for de ulike delene. Bildet er hentet fra ³⁴ og redigert.	14
Figur 7: Viser variasjonen i virkningsgraden til en elektrisk motor med varierende last. Hentet fra ³⁷	15
Figur 8: Oversiktsbilde over den hydrogentraktoren, med nummerering for de ulike delene. Bildet er hentet fra ³⁴ og redigert.	19
Figur 9: Oversiktsbilde over låven brukt til simuleringen av solenergi, med viktige dimensjoner påtegnet.	23
Figur 10: Oppsett av solcellemoduler på låvetaket. Til venstre: nord-/sørvendt låve, til høyre: øst-/vestvendt låve.	25
Figur 11: Oversiktsbilde av låven og området rundt brukt i spesialtilfelle 1.	27
Figur 12: Viser definisjonen av høydevinkelen, h' , til fjerne skyggeleggere.	27
Figur 13: Viser definisjonen av asimutvinkelen til fjerne skyggeleggere. Figuren er tegnet fra oversiden av låven.	28
Figur 14: Oversiktsbilde over låven brukt til simuleringen av spesialtilfelle 3: Nyere låver.	28
Figur 15: Viser en oversikt over oppsettet til ladestasjon, nett og PV-anlegg på låven.	30
Figur 16: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Balsfjord.	49
Figur 17: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Balsfjord.	49
Figur 18: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Balsfjord.	50
Figur 19: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Balsfjord.	50
Figur 20: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Balsfjord.	52
Figur 21: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Balsfjord.	52
Figur 22: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Verdalen.	54
Figur 23: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Verdalen.	55
Figur 24: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Verdalen.	55
Figur 25: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Verdalen.	56
Figur 26: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Verdalen.	57
Figur 27: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Verdalen.	57

Figur 28: Viser månedlig sammenligning av forbruk og produksjon av elektrisk energi ved den årlige energibalansen på Sola.....	59
Figur 29: Viser månedlig sammenligning av forbruk og produksjon av elektrisk energi ved den årlige energibalansen på Sola.....	60
Figur 30: Viser månedlig sammenligning av forbruk og produksjon av elektrisk energi ved den månedlige energibalansen på Sola.....	60
Figur 31: Viser månedlig sammenligning av forbruk og produksjon av elektrisk energi ved den månedlige energibalansen på Sola.....	61
Figur 32: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen på Sola.	62
Figur 33: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen på Sola.	62
Figur 34: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Ås.	64
Figur 35: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Ås.	65
Figur 36: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Ås.....	65
Figur 37: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Ås.....	66
Figur 38: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Ås.	67
Figur 39: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Ås.	67

Liste over tabeller

Tabell 1: Oversikt over lagringskapasitet, temperaturkrav ved hydrogenbruk og trykk for to ulike metallhydridtanker. Tallene er hentet fra kilde ⁵⁰	21
Tabell 2: Typiske mål for eldre og nyere låvebygg for gårder med 50 melkekyr. ⁵¹	24
Tabell 3: Oversikt over prosentandelen av modularealet som er dekket av snø hver måned for de ulike områdene.....	26
Tabell 4: Oversikt over albedoverdier for bakken for hver måned ved de ulike områdene.....	26
Tabell 5: Verdier lagt inn i simuleringen i PVsyst for spesialtilfelle 2: Fjern skyggelegging.	28
Tabell 6: Viser effektberegningene gjort for dieseltraktoren ved ulike jordbruksprosesser, hvor utgangspunktet er dieselforbruket i timen hentet fra kilde ⁶¹	41
Tabell 7: Viser effekten som levers fra hjul og til kraftuttak, samt effektbehovet fra batteripakken ved ulike jordbruksprosesser.	42
Tabell 8: Viser energibehovet fra batterier og antall batteripakker for 12 arbeidstimer for de ulike jordbruksprosessene.	43
Tabell 9: Viser forbruksraten av hydrogen i hydrogentraktoren og lagringsbehovet til traktoren ved 12 timers kjøring.	44
Tabell 10: Viser den totale lagringskapasiteten i kg og massen til de ulike 200 liters hydrogentankløsninger.	44
Tabell 11: Viser antallet påfyllinger av tanken ved en 12 timers økt ved bruk av de ulike 200 liters tank-systemene. LT – lavt trykk, HT – høyt trykk.	44
Tabell 12: Viser gjennomsnittlige virkningsgrader i ulike deler av PV-anlegget, samt den totale gjennomsnittlige virkningsgraden til PV-anlegget.	45
Tabell 13: Viser simulert månedlig og årlig produsert elektrisk energi fra PV-anleggene i hovedsimuleringene. Alle tall er i MWh.....	45
Tabell 14: Viser simulert månedlig og årlig produsert elektrisk energi fra PV-anleggene i spesialtilfellene. Alle tall er i MWh, og simuleringene er gjort med sørvendte låver i Ås.	46
Tabell 15: Viser traktorens energibehov fra batteriene ved 12 timers bruk av traktoren, det tilsvarende energibehovet fra ladestasjonen og effektbehovet når oppladningen skal skje over 24 timer.	46
Tabell 16: Viser lagringsbehovet i traktoren ved 12 timers bruk, tilsvarende elektriske energi til hydrogenproduksjonen og innfyrt effekt til hydrogenstasjon når produksjonen skal skje i løpet av 24 t.....	47
Tabell 17: Viser årlig timesforbruk, årlig tidsforbruk per dekar og perioden for jordbruksprosessene i Balsfjord.....	47
Tabell 18: Viser månedlig forbruk av elektrisk energi fra ladestasjonen for den batteridrevne traktoren i Balsfjord.	48
Tabell 19: Viser årlig tilgjengelig elektrisk energi ved ladestasjonen, og arealene som kan driftes ved en årlig energibalanse i Balsfjord.	48
Tabell 20: Viser månedlig forbruk av hydrogen fra hydrogentraktoren i Balsfjord.	51
Tabell 21: Viser årlige tall for tilgjengelig elektrisk energi til hydrogenproduksjon, produsert mengde hydrogen, og arealet som kan driftes ved denne hydrogenproduksjonen.....	51
Tabell 22: Viser årlig timesforbruk, årlig tidsforbruk per dekar og perioden for jordbruksprosessene i Verdal.	53
Tabell 23: Viser månedlig forbruk av elektrisk energi fra ladestasjonen for den batteridrevne traktoren i Verdal.	53

Tabell 24: Viser årlig tilgjengelig elektrisk energi ved ladestasjonen, og arealene som kan driftes ved en årlig energibalanse i Verdal.	54
Tabell 25: Viser månedlig forbruk av hydrogen fra hydrogentraktoren i Verdal.	56
Tabell 26: Viser årlige tall for tilgjengelig elektrisk energi til hydrogenproduksjon, produsert mengde hydrogen, og arealet som kan driftes ved denne hydrogenproduksjonen.	57
Tabell 27: Viser årlig timesforbruk, tidsforbruk per dekar og periode for jordbruksprosessene på Sola.	58
Tabell 28: Viser månedlig forbruk av elektrisk energi fra ladestasjonen for den batteridrevne traktoren på Sola.	58
Tabell 29: Viser årlig elektrisk energi ved ladestasjonen og arealene som kan driftes ved årlig energibalanse på Sola.	59
Tabell 30: Viser månedlig forbruk av hydrogen per dekar for hydrogentraktoren på Sola.	61
Tabell 31: Viser månedlige tall for elektrisk energi tilgjengelig til hydrogenproduksjon, produsert mengde hydrogen og arealene som kan driftes ved denne hydrogenproduksjonen.	62
Tabell 32: Viser årlig timesforbruk, årlig tidsforbruk per dekar og perioden for jordbruksprosessene i Ås.	63
Tabell 33: Viser månedlig forbruk av elektrisk energi fra ladestasjonen for den batteridrevne traktoren i Ås.	63
Tabell 34: Viser årlig elektrisk energi ved ladestasjonen, og arealet som kan driftes ved årlig energibalanse i Ås.	64
Tabell 35: Viser månedlig forbruk av hydrogen fra hydrogentraktoren i Ås.	66
Tabell 36: Viser årlige tall for tilgjengelig elektrisk energi til hydrogenproduksjon, produsert mengde hydrogen, og arealene som kan driftes ved denne hydrogenproduksjonen.	67
Tabell 37: Viser Well- to wheel virkningsgradene for de ulike traktorsystemene i denne oppgaven. .	68
Tabell 38: Viser en oversikt over jordbruksarealene som kan driftes av den batteridrevne traktoren ved en månedlig energibalanse og hvor stor andel av den produserte elektrisiteten fra PV-anlegget som benyttes ved driften av disse jordbruksarealene.	74
Tabell 39: Viser en oversikt over jordbruksarealene som kan driftes av den batteridrevne traktoren ved en årlig energibalanse i de ulike områdene.	75
Tabell 40: Viser en oversikt over jordbruksarealene som kan driftes av hydrogentraktoren i de ulike områdene.	76
Tabell 41: Oversikt over jordbruksarealene som kan driftes i de ulike områdene med de to elektriske traktorene med energien fra PV-anlegget på låvetaket. Årlig betyr at det er gjort en årlig energibalanse mellom forbruk og produksjon av elektrisk energi/hydrogen, og månedlig betyr at det er gjort en månedlig energibalanse.	79
Tabell 42: Sammenligning av de ulike systemenes WTW-virkningsgrader.	80

Symbolliste

Symbol	Forklaring	Enhet
η_M	Virkningsgrad dieselmotor	---
η_G	Virkningsgrad girkasse	---
η_{HVD}	Virkningsgrad hoveddrivverk	---
η_{KUD}	Virkningsgrad kraftuttaksdrivverk	---
κ	Koeffisient for andel tapt hjulgrep	---
i	Koeffisient for grad av sluring for traktorhjul	---
ρ	Koeffisient for grad av rullemotstand for traktor	---
η_{HJ}	Virkningsgrad for overføring av effekt mellom hjul og underlag	---
P_{inn}	Effekt inn til traktor	W
F_D	Forbruk av diesel	L/t L/h
BV	Nedre brennverdi for diesel	kWh/L
P_{KU}	Effekten levert fra kraftuttaket på dieseltraktoren	W
P_{utT}	Den totale nyttbare effekten levert fra traktoren	W
P_{HJ}	Effekten levert fra hjulene på traktoren	W
η_{HVDtot}	Den totale virkningsgraden for hoveddrivverkkjeden	---
η_{totT}	Den totale virkningsgraden til traktoren	---
η_{KU}	Andelen av effekten fra motoren som sendes på kraftuttaksdrivverket	---
η_{HVD}	Andelen av effekten fra motoren som sendes på hoveddrivverket	---
η_{KUDtot}	Den totale virkningsgraden for kraftuttaksdrivverkkjeden	---
η_O	Virkningsgraden til omformer	---
η_{EM}	Virkningsgraden til elektrisk motor	---
η_{EKU}	Virkningsgraden til elektrisk kraftuttak	---
η_B	Virkningsgraden til batteripakke	---
P_B	Effekten fra batteriet	W
P_{EM}	Effekten fra den elektriske motoren	W
P_{EKU}	Effekten fra det elektriske kraftuttaket	E
E_B	Energibehovet fra batteriet	kWh
t	Tid	s
$\#_B$	Antall batteripakker	---
$E_{B,pak}$	Tilgjengelig energi per batteripakke	kWh
η_{FC}	Virkningsgraden til brenselcellen	---
μ_f	Andelen brukt aktivt materiale levert til brenselcelle	---
V_C	Cellespenning	V
C_V	Volumetrisk kapasitet for hydrogentank	g/L
W_t	Vektprosenten	g/g
F_{H_2}	Hydrogenforbruk i brenselcelle	kg/s
M_{H_2}	Molar masse for hydrogen	g/mol
P_E	Den elektriske effekten som trekkes fra brenselcelle	W
F	Faradays konstant	C/mol
LB_{H_2}	Lagringsbehov for hydrogen	kg
m_{H_2}	Masse hydrogen lagret i hydrogentank	g
V	Volum av hydrogentank	L
m_{H_2-tank}	Den totale massen av hydrogentank	g
$\#_{H_2}$	Antall påfyllinger av hydrogentank	---
L	Lengde	m

b	Bredde	m
h	Høyde	m
α	Takvinkel eller asimutvinkel	°
h'	Høydevinkel	°
η_{ytre}	Virkningsgraden til ytre påvirkninger på PV-anlegg	---
η_{modul}	Virkningsgraden til PV-modulene	---
η_{vr}	Virkningsgraden til vekselretter	---
η_{PV}	Virkningsgraden til PV-anlegget som helhet	---
η_{LS}	Virkningsgraden til ladestasjonen	---
E_L	Energibehovet fra ladestasjon	kWh
P_L	Effektbehovet fra ladestasjon	W
η_{ELyse}	Virkningsgraden til elektrolysøren	---
η_{HP}	Virkningsgraden til hydrogenproduksjonsstasjonen	---
ER	Energien som trengs for å produsere 1 kg hydrogen	kWh/kg
E_{prod, H_2}	Energien som trengs for å produsere en viss mengde hydrogen	kWh
P_{prod, H_2}	Effekten som trengs for å produsere en viss mengde hydrogen	W
T	Tidsbruk per jordbruksprosess per dekar	t/daa h/daa
A	Areal	daa
ED	Energi- eller hydrogenforbruk per måned per dekar	kWh/daa kg/daa
P_{bruk}	Effekten eller hydrogenforbruk for jordbruksprosess	W kg/t kg/h
E_{prod}	Tilgjengelig energi fra ladestasjon eller tilgjengelig masse hydrogen fra hydrogenproduksjonsstasjon i løpet av et år eller en måned	kWh kg
E_{dekar}	Forbrukt energi eller hydrogen per måned eller år i traktoren	kWh kg
$\eta_{WTW, DT}$	«Well – to - wheel» - virkningsgrad for dieseltraktorsystemet	---
$\eta_{WTT, D}$	«Well – to - tank» - virkningsgrad for dieselen	---
$\eta_{WTW, PV \rightarrow EL}$	«Well – to - wheel» - virkningsgrad for PV-anlegg til elektrisk traktor	---
$\eta_{WTW, PV \rightarrow H}$	«Well – to - wheel» - virkningsgrad for PV-anlegg til hydrogen traktor	---
$\eta_{WTW, N \rightarrow EL}$	«Well – to - wheel» - virkningsgrad for vannkraftverk til elektrisk traktor	---
η_{VK}	Virkningsgraden til et vannkraftverk fra demning til nett	---
η_{KN}	Virkningsgraden til kraftnettet	---

1 Innledning

I dette kapittelet blir bakgrunnen for oppgaven, problemstillingen til oppgaven med tilhørende avgrensninger og tidligere arbeider på elektrifisering av traktoren gjennomgått. Mot slutten av kapittelet er det også gitt en kort gjennomgang av oppsettet til oppgaven.

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Klimagassutslippene fra landbruket i Norge er samlet sett på 4,7 millioner CO₂-ekvivalenter, og står med dette for 9 % av Norges samlede klimagassutslipp. ¹ Utslippene fra landbruket kommer i hovedsak i form av utslipp av lystgass og metan, men utslipp av CO₂ vil også bidra til disse utslippene. I følge National Energy Foundation, ², slippes det ut 2,6 kg CO₂ per liter forbrukt diesel. Når dieselforbruket i jordbruket på 128 millioner liter per år (2011), bli de totale CO₂-utslippene store. ³

Formålet med denne oppgaven er å belyse de nye mulighetene som finnes i den teknologiske utviklingen som er i dag. Det er på tide og mulig å tenke nytt, tenke miljø og tenke kreativt. I 2011 var det elektriske forbruket i jordbruket på i overkant av 1200 GWh, og beregnet ut fra en brennverdi på 10,10 kWh/L for diesel blir energiforbruket fra diesel på rundt 1300 GWh. ^{3,4} Hva om man kunne erstattet dieselforbruket med elektrisk forbruk?

Potensialet for økt bruk av solenergi i Norge er stort, tilskuddsordninger er på plass og den teknologiske utviklingen av PV-moduler og –anlegg har kommet til et punkt hvor det kan lønne seg å installere slike anlegg på taket. I 2012 var det gjennomsnittlige årlige forbruket av elektrisk energi i norske husholdninger på 16 MWh, og med de store låvetakene som er i Norge bør det være store muligheter til å kunne produsere nok elektrisk energi til å dekke flere husstander. ⁵

Batteriteknologien er på vei fremover. Utviklingen går mot lettere og billigere batteripakker, som derfor får en høyere spesifikk lagringsevne en tidligere. Dette gjør at markedet for elektriske biler er i rask vekst, i alle fall i Norge.

I perioden som denne oppgaven skrives er det snakk om en stor utvikling på hydrogenbilfronten. Brenselcellene og hydrogenbilene blir billigere, og det er snakk om utvikling av flere stasjoner for påfylling av hydrogen. ⁶ Det bør derfor være store muligheter for både batteridrevne og hydrogendrevne traktorer, i alle fall i fremtiden.

Det er utfordringer koblet til bruk av elektriske traktorer, både når de drives av batterier og hydrogen. Batteripakkene er fortsatt relativt dyre, tunge og store. Prisen på batteripakkene gjør at man ikke kan ha for mange batterier ved en gård, med mindre de kan brukes til mer enn bare traktoren. Det at de er tunge og store setter begrensninger på hvor store batteripakker som kan brukes. Det blir derfor et behov for å lade batteriene raskt og ofte i perioder som traktoren brukes mye. Hydrogentankene er også store og tunge, og kan bare lagre en begrenset mengde hydrogen. Dette fører til hyppige påfyllinger av tanken, og begrenser hvor lenge traktoren kan jobbe ute på jordet av gangen.

Med den utviklingen som er i batteri- og hydrogenindustrien i dag, både teknologisk og økonomisk, vil antageligvis mange av utfordringene med de elektriske traktorene kunne løses i fremtiden. Det er derfor ikke et stort fokus på om det er mulig med elektriske traktorer i dag, men hva som er

mulighetene for fremtiden. Spørsmålet som besvares i denne oppgaven er derfor mer om det er energimessig mulig å ha et system hvor traktorene kan driftes av energi fra et PV-anlegg på låvetaket, enn om det er praktisk mulig å få det til i dag.

1.2 Problemstillinger og avgrensninger

Problemstillingen i denne oppgaven er:

Hvor store jorder kan driftes av en elektrisk traktor drevet av et PV-anlegg på låvetaket?

Det vil i denne oppgaven bli sett på to elektriske traktorer: en batteridrevet traktor og en hydrogendrevet traktor. Fokuset i oppgaven er derfor å se på de elektriske traktorene som «fyller tanken» med energi fra PV-anlegget. For den batteridrevne traktoren vil det være nødvendig med en utveksling av energi med nettet i tillegg til energien fra PV-anlegget, da det ikke er noen garanti for at sola skinner når batteriene må lades. Batteriene må også kunne skiftes ut, da det ikke er mulig for traktoren å stå i ro den tiden det tar å lade opp batteriene. For hydrogentraktoren er systemet noe mer fleksibelt, da hydrogenet kan mellomlagres i en egen tank, og er derfor ikke avhengig av at produksjon og forbruk sammenfaller. Utgangspunktet for energibruken til de to elektriske traktorene er dieselforbruket til den konvensjonelle dieseltraktoren.

Spørsmål som det vil fokuseres på i denne oppgaven er derfor:

- Hvis det kun fokuseres på energiutnyttelsen. Hvor store jorder kan driftes av elektriske traktorer med et PV-anlegg på låvetaket?
- Med teknologien som er i dag: Er det praktisk gjennomførbart å drifte jordene med elektriske traktorer?
- Hva er den totale virkningsgraden til de ulike systemene, og hvilket traktorsystem er mest effektivt?

Det mangler en del forskning innen landbruket i Norge, og traktorene som diskuteres i denne oppgaven har ikke blitt bygget og testet ut. Det blir derfor gjort en del antagelser og satt en del begrensninger i denne oppgaven.

De største antagelsene som er gjort i denne oppgaven er som følger:

- Virkningsgradene til komponentene i systemene er konstante, og har derfor en fast verdi.
- For hver jordbruksprosess er dieselforbruket konstant hele tiden, og for alle områder traktoren brukes.
- Tidsforbruket per dekar dyrket mark for ulike jordbruksprosesser, er likt ved alle gårder i et område. Det tas derfor utgangspunkt i tidsforbruket til en gård i hvert område det sees på i denne oppgaven, og dette settes som standard for alle gårder i området.
- Det er ikke noen skyggeelementer for PV-anlegget.

Hvilken innvirkning disse antagelsene vil ha for resultatene vil kommenteres mer i detalj i kapittel 7: Diskusjon.

Det er ikke tatt utgangspunkt i hvilke komponenter som skal brukes i de forskjellige systemene i denne oppgaven. Dette er fordi valgmulighetene ofte er mange, og at slike avgjørelser først bør tas når systemene skal bygges. Det er i noen sammenhenger tatt utgangspunkt i teknologier som er tilgjengelig på markedet i dag, for at det skal være mulig å utføre beregninger.

For å kunne si noe om virkningsgraden til traktorer, ladestasjon, hydrogenproduksjonsstasjon og PV-anlegg er det satt opp en rekke systemgrenser. De satte systemgrensene er:

- Batteritraktoren: Batteriet er en del av traktoren. Batteriets virkningsgrad er derfor en del av traktorens virkningsgrad.
- Hydrogentraktoren: Hydrogentanken er en del av traktoren, og systemgrensen for traktoren settes ved påfyllingen av hydrogen.
- Ladestasjon for batterier: systemgrensen for ladestasjonen er satt ved fordelingsboksen. Omformerer for elektrisk energi mellom fordelingsboks og ladestasjon er derfor en del av ladestasjonen.
- Hydrogenstasjonen: systemgrensene for hydrogenstasjonen er satt ved fordelingsboksen og ved påfylling av hydrogen på traktoren. Både omformerer etter fordelingsboksen og kompressor til hydrogengassen er derfor en del av stasjonen.
- PV-anlegget: PV-anlegget inkluderer ytre påvirkninger som skyggelegging fra snø og alle komponenter ned til fordelingsboksen.

1.3 Tidligere arbeid

1.3.1 Utskiftning av batterier

På grunn av den raske økningen i elektriske biler, og den noe tregere utviklingen av hurtigladere har det vært forsket en del på stasjonsløsninger for bytting av batterier istedenfor oppladning av batterier.

Utbyttingsstasjoner er stasjoner hvor bilene kjører inn, de utladete batteriene tas ut av bilen og erstattes av ferdig oppladete batterier, før bilen igjen kan kjøre videre. Selve utskiftningen av batterier kan skje på under to minutter, og er en sterk reduksjon av ladetiden som selv med hurtigladere kan være på hele 30 minutter.⁷ Tanken bak en slik infrastruktur er at man skal kunne lade bilen for korte kjøreturer hjemme, på jobb eller mens du er i butikken, og bruke utskiftningsstasjonene for lengre kjøreturer.⁸

De utladete batteriene som tas ut av bilene lades opp og kan settes inn i en annen bil. Ved slike løsninger endres eierforholdet til batteriene fra elbileier til eiere av utskiftningsstasjonene. Dette er en stor fordel for elbileiere, da batteriet er en komponent med kortere levetid enn det de andre komponentene i elbilen har.⁸ Utskiftningsteknologien er prøvd ut av bl.a. Better Place og Tesla.

Better Place:

Better Place var den første til å lage et nettverk av utskiftningsstasjoner for elektriske biler, og hadde et testopplegg for dette i Israel. Målet med prosjektet var å lage en «ladestasjon» som gjorde oppladningen raskere enn å fylle en vanlig diesel- eller bensintank. Løsningen ble utskiftningsstasjonene. Israel ble valgt som test-område på bakgrunn av høye oljepriser i landet og et ønske om å redusere landets avhengighet til oljen. Prosjektet skulle videreutvikles til Danmark, Australia og Nord-Amerika, men selskapet gikk konkurs i mai 2013^{8,9}. For å se hvordan utskiftningsstasjonen fungerer i praksis, kan du se filmen fra kilde¹⁰.

Tesla:

Tesla jobber med å utvikle et tilsvarende konsept som det Better Place hadde, og stiller selv med en elbilmodell med teknologi for utskiftning av batterier. Den første stasjonen ble bygget langs en trafikkert strekning mellom to storbyer i California i USA, og er en teststasjon for videre utvikling av stasjonsnettverket. Teststasjonen ble tatt i bruk i månedsskiftet januar/februar 2015, men kun for testing.¹¹ En demonstrasjon av hvordan utskiftningen fungerer er gitt i filmen fra kilde ¹².

Utover dette finnes det flere andre tilfeller hvor batteriutbytingsteknologien brukes for kjøretøy, bl.a. for elektrisk scooter ¹³, varebilutleie med mindre høyteknologiske utskiftingsstasjoner ¹⁴ og elektriske gaffeltrucker ¹⁵.

1.3.2 Elektriske og hydrogendrevne traktorer

Det er en del tidligere arbeider som omhandler elektriske traktorer, spesielt små traktorer som ikke egner seg til tungt jordbruksarbeid. Eksempler på slike traktorer er:

- Små batteridrevne traktorer, ladet opp av solceller på taket av traktoren eller fra ekstern energikilde. Selve traktoren med solceller på taket har oppgitt en virkningsgrad på hele 70 %.¹⁶
- Masseproduksjon av små batteridrevne traktorer til enkelt arbeid som gressklipping, trekking og kan brukes både inne og ute. ¹⁷

For begge de overnevnte traktorene viser produsentene til at det er færre bevegelige deler, og derfor har lengre levetid og mindre vedlikehold.

De overnevnte traktorene skiller seg fra traktorene det skal sees på i denne oppgaven ved at de ikke egner seg til bruk for tungt jordbruksarbeid. Videre undersøkelser viser at det er en utvikling mot elektrifisering av den konvensjonelle traktoren, som for eksempel:

- Fendt, en tysk produsent av traktorer, har sett på løsninger for elektrifisering av traktoren. De har kommet frem til et produkt med elektrifisert kraftuttak, hvor den elektriske effekten produseres av en generator som er koblet til dieselmotoren. De har også utviklet redskaper som kan kobles til det elektriske kraftuttaket og til kontrollpaneler inne i traktoren. Utviklingen av traktoren startet som et forskningsprosjekt i 2001, i 2008 begynte de med utarbeidelse og testing av traktor og utstyr, og selve traktoren ble presentert for publikum for første gang i 2013. ¹⁸⁻²⁰
- Valtra, en finsk traktorprodusent, har sett på hvordan fremtidens traktorer kan se ut. Forslaget er små lette traktorer som kan kobles sammen for ekstra trekkeeffekt, og som drives helt eller delvis av elektrisitet. Traktorene skal også kunne kjøre av seg selv eller med fører, og blir derfor en robotaktig traktor.²¹ En film på hvordan de vil fungere kan du finne i kilde ²².
- New Holland Agriculture, en internasjonal traktorprodusent med utspring fra Italia, har produsert en helelektrisk traktor drevet av hydrogen og en brenselcelle. Traktoren er ment til bruk i jordbruk hvor jordbruket er selvforsynt på energi, og hvor traktoren kun slipper ut vann og vanndamp. ^{23, 24}
- Tanken med batteridrevne traktorer med utskiftbare batterier har også blitt tenkt før, og skal ha blitt sendt inn som et forslag til en internasjonal konkurranse for grønne forretningsideer. Ideen kan sees i sin helhet i filmen i kilde ²⁵, og skal ha blitt sendt inn til konkurransen av en

britisk gårdseier. Informasjon om konkurransen kan du finne i kilde ²⁶, og informasjonen om filmen er hentet fra produsenten av filmen, ²⁷.

Det er også en del forskning på robotbruk i landbruket, og bl.a. Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) er inne i et prosjekt for å utvikle en slik robot. Tanken bak jordbruksroboten er at den er selvdrevet og kan jobbe på jordene 24 timer i døgnet, 7 dager i uken. Fordelen med å ta i bruk roboten i jordbruket er at de er lette, og at man derfor kan slippe unna problemer relatert til pakking av jorda. Pakking av jorda er et problem i jordbruket, da traktorene er svært tunge og derfor presser vann og luft ut av jordsmonnet. ^{28, 29} For å lære mer om robotutviklingen ved NMBU, kan du lese tidligere masteroppgaver på temaet på kildene ^{28, 30-32}

1.4 Oppgavens struktur

Kapittel 1:

I dette kapitlet blir det gått gjennom bakgrunnen og motivasjonen for oppgaven, problemstilling med avgrensninger og tidligere arbeider gjort på elektrifisering av traktoren og utskiftningsteknologien for batterier.

Kapittel 2:

Tar for seg teori og metode for dieseltraktoren, batteritraktoren og hydrogentraktoren. Fokuset i dette kapitlet er på beregning av energi- og effektflyt i traktorene, virkningsgraden til sentrale komponenter i traktorene og hvilke tap som er i komponentene. For hydrogentraktoren er også teorien bak beregninger for hydrogenforbruk gjennomgått.

Kapittel 3:

Tar for seg teori og metode for solenergi, ladestasjon for batterier og hydrogenproduksjonsstasjonen. Det er fokus på beregninger av energi- og effektflyt, oppbygning og virkningsgrader for komponentene i systemene. For hydrogenproduksjonsstasjonen er det også teorien bak beregningene for produksjon av hydrogen gjennomgått.

Kapittel 4:

Kapitlet gjennomgår datagrunnlaget for beregningene og simuleringene som er gjort i denne oppgaven. Hvert delkapittel gir en kort gjennomgang av datagrunnlaget for dieselforbruk, solenergisimuleringen, tidsbruk og periodene hvor jordbruksprosessene utføres og størrelsene på jordbruksområdene i de ulike områdene det er fokusert på i denne oppgaven.

Kapittel 5:

I dette kapitlet blir det gjennomgått teori og metode for de ulike traktorsystemene som helhet. Teorien gitt i dette kapitlet har som formål å sette produsert energi ved PV-anlegget sammen med forbruket av energi i traktoren, for å finne størrelsen på jordbruksarealene som kan driftes av de elektriske traktorene i de ulike områdene. Kapitlet tar også for seg «Well-to-wheel» - analyser av virkningsgraden til de ulike systemene.

Kapittel 6:

Dette kapitlet viser resultatene for beregningene beskrevet i kapittel 2, 3 og 5. Hovedfokuset i dette kapitlet er systemene som helhet, men det er også gitt resultater for beregninger utført for traktorer, stasjoner og produsert energi fra PV-anlegget.

Kapittel 7:

I dette kapitlet diskuteres resultatene gitt i kapittel 6. Det er i diskusjonen fokus på å besvare spørsmålene gitt i delkapittel 1.2. Mot slutten av dette kapitlet gjennomgås noen forslag til videre arbeid.

Kapittel 8:

Er en oppsummering av de viktigste konklusjonene som settes i kapittel 7, samt en oversikt over de viktigste resultatene som ble funnet i denne oppgaven.

2 Traktorene

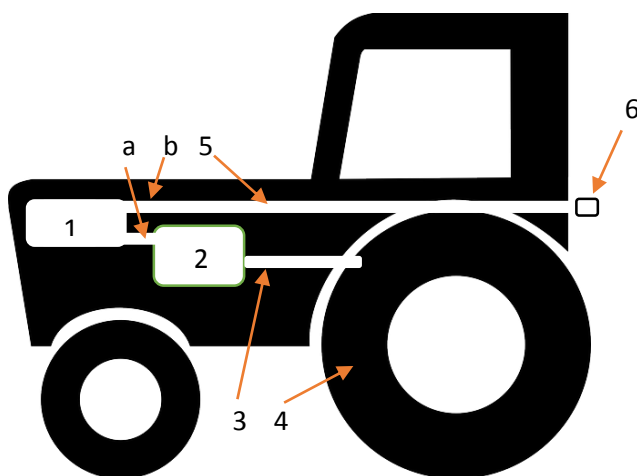
I dette kapittelet blir det gjennomgått teori og fremgangsmåte for beregninger av virkningsgraden til og energiflyten i dieseltraktoren, batteritraktoren og hydrogentraktoren. Oppsettet av de ulike traktorene blir også gjennomgått her.

2.1 Dieseltraktoren

Teorien bak dieseltraktoren er i hovedsak hentet fra kilde ³³, dersom andre kilder er brukt vil disse oppgis i teksten.

2.1.1 Oppbygning av dieseltraktoren

Dieseltraktoren er i enkle trekk bygget opp som vist i figur 1.



Figur 1: Oversiktsbilde over dieseltraktoren med nummerering av de ulike komponentene. Bildet er hentet fra ³⁴ og redigert.

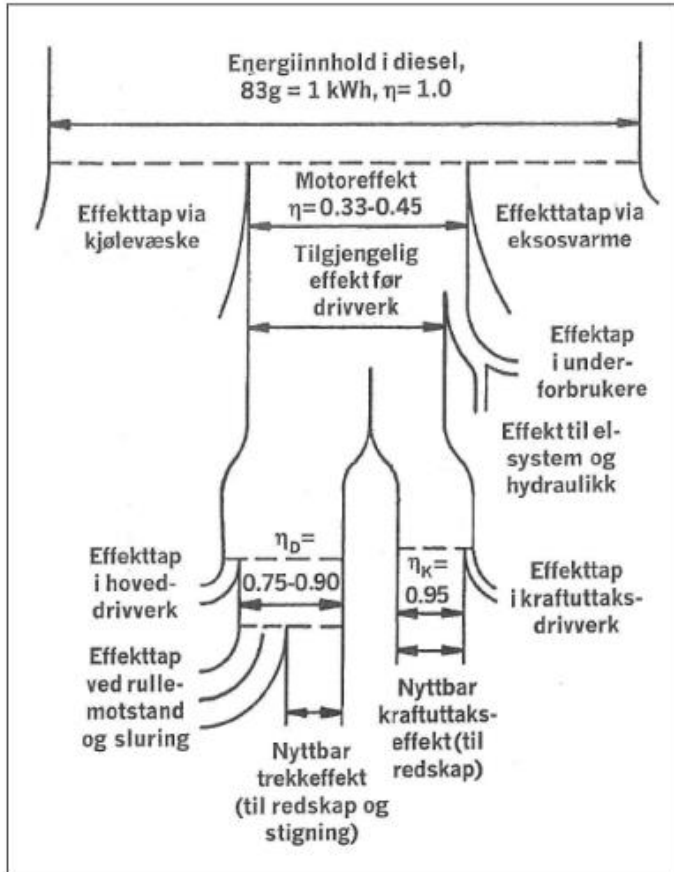
Dieselen blir forbrent i motoren (1), som gjør om kjemisk energi gjennom forbrenning av dieselen til mekanisk energi på to akslinger (a og b). Akslingene får et turtall og kan avgi effekt gjennom et dreiemoment. Aksling (a) går til girkassen (2) hvor turtallet endres for å få en mer effektiv overføring av mekanisk energi til hoveddrivverket (3). Hoveddrivverket overfører mekanisk effekt til hjulene (4). Aksling (b) er en del av krafttaksdrivverket (5), som går til kraftuttaket (6). Oppbyggingen av krafttaksdrivverket variere mye, og det vil i denne oppgaven tas utgangspunkt i den enkle koblingen som er vist i figuren.

Figur 1 viser at effekten fra motoren fordeler seg på to drivverk: hoveddrivverket fram til traktorhjulene og krafttaksdrivverket fram til kraftuttaket. Kraftuttaket er en aksling som kan kobles direkte til redskaper som brukes i landbruket, som for eksempel til gjødsling og sprøyting. Ved hjelp av dreiemomentet og turtallet på kraftuttaket får redskapene tilført mekanisk effekt, noe som kan redusere trekraften som trengs fra selve traktoren. Fordi tapsberegninger for de forskjellige redskapene som kobles til traktoren er utenfor temaet for denne oppgaven, regnes effekten som går til kraftuttaket og hjulene som nyttbar effekt.

Når det ikke er koblet redskaper til kraftuttaket på traktoren, går all effekt i hoveddrivverket. Når redskaper er koblet til kraftuttaket sendes 60-80 % av effekten fra motoren til krafttaksdrivverket og det resterende til hoveddrivverket.

2.1.2 Komponentene i dieseltraktoren

For å finne den nyttbare effekten/energien som leveres fra traktoren ut på kraftuttak og fra hjulene til underlaget er det i denne oppgaven satt fokus på å bruke virkningsgradene til de ulike komponentene i traktoren, som vist i figur 1. En figur over effektflyten i traktoren er vist i figur 2, hvor det også vises hvor det er tap i traktoren.



Figur 2: Flyttdiagram som viser effektflyten gjennom dieseltraktoren. Hentet fra ³³.

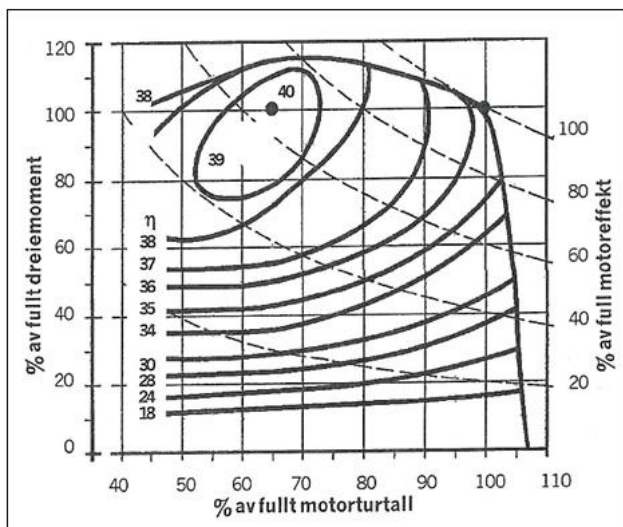
Figur 2 viser hvor det er effektutslipp i traktoren, samt at effektberegninger må gjøres i to omganger: med og uten effektflyt til kraftuttaket. Dette skyldes at det ikke sendes noe effekt ut på kraftuttaket når det ikke er påkoblet redskaper til denne.

Det å finne virkningsgradene til de ulike komponentene i traktoren er en komplisert oppgave. Dette fordi virkningsgraden for hver av traktorens komponenter er avhengig av en rekke fysiske egenskaper ved traktoren, kjøreforhold og hvordan traktoren brukes av føreren. Det er allikevel fokus på å finne en virkningsgrad for hver komponent i denne oppgaven, da dette vil gjøre beregningene enklere.

Motoren:

Motorens virkningsgrad er i hovedsak avhengig av turtallet motoren kjøres på, dreiemomentet på akslingen, hvor stor andel av full motoreffekt som utnyttes, og hvor stor andel av drivstoffet som forbrennes. Tapene i motoren kommer i hovedsak av varmetap, friksjon, vibrasjoner og støy.

Kurvedigrammet i figur 3 viser hvordan virkningsgraden til en gjennomsnittlig traktormotor varierer med turtall, dreiemoment og utnyttet effekt.



Figur 3: Kurvediagram for dieselmotorens virkningsgrad. Viser virkningsgradens variasjon med andelen brukt dreiemoment, motorturtall og av motorens merkeeffekt. Hentet fra ³³.

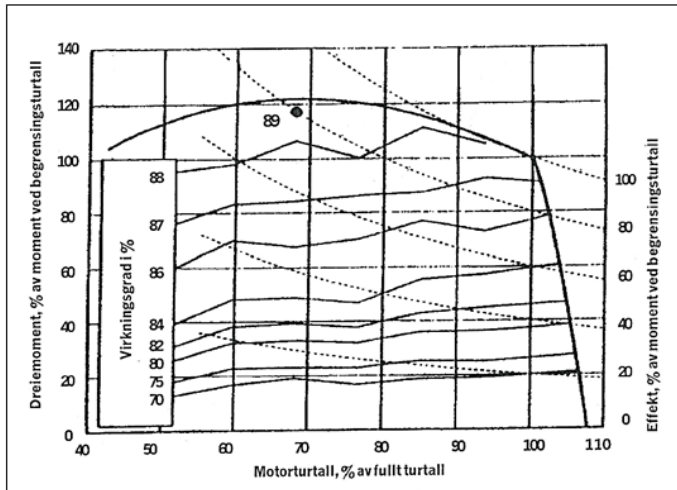
Fra kurvediagrammet i figur 3 er det vist at virkningsgraden til motoren varierer fra 18% til 40%. Virkningsgraden er i det lave området når traktoren brukes til lett kjøring, som for eksempel ved gjødsling. Den er i det høye området når traktoren brukes til tyngre kjøring, som for eksempel pløying og trekking. Mye av grunnen til at virkningsgraden er så lav ved lett kjøring er at motoren ikke drives i nærheten av det dreiemomentet, turtallet og motoreffekten den er laget for, samt at traktoren ofte blir stående mye på tomgang. ²⁹

Hvilken verdi man skal sette motorens virkningsgrad til å være er en vanskelig oppgave ettersom den varierer så mye. Den er i denne oppgaven valgt å settes til å være $\eta_M = 0,33$, da dette vil være i det øvre sjiktet av traktorens kjøremodus. Grunnen til at det er valgt å sette den så høy, er at det er når traktoren kjøres tungt at det forbrukes mest drivstoff. Det er derfor i dette området det vil være viktigst å dimensjonere den elektriske traktoren og hydrogentraktoren så riktig som mulig.

Girkassen:

Virkningsgraden til girkassen varierer med dreiemoment, motorturtall og motoreffekt, og er avhengig av om girkassen styres rent mekanisk, hydraulisk eller elektrisk. Tapene i girkassen kommer i hovedsak av varmetap på grunn av friksjon mellom bevegelige deler og til transport av smøreolje i girkassen.

Kurvediagrammet for virkningsgraden til en gjennomsnittlig girkasse er som vist i figur 4.



Figur 4: Kurvediagram for virkningsgraden til girkassen. Viser virkningsgradens variasjon med andelen brukt dreiemoment, motorturtall og motoreffekt. Hentet fra ³³.

Kurvediagrammet i figur 4 viser at virkningsgraden kan variere mellom 70 – 89 %, og det vil i tillegg til vanlige driftstap være et tap på rundt 3 – 5 % av effekten ved giring. Det vil i denne oppgaven bli sett bort fra giringen, og kun fokuseres på de konvensjonelle driftstapene. Virkningsgraden til girkassen varierer mindre enn virkningsgraden til motoren, og settes i denne oppgaven til å være $\eta_G = 0,85$.

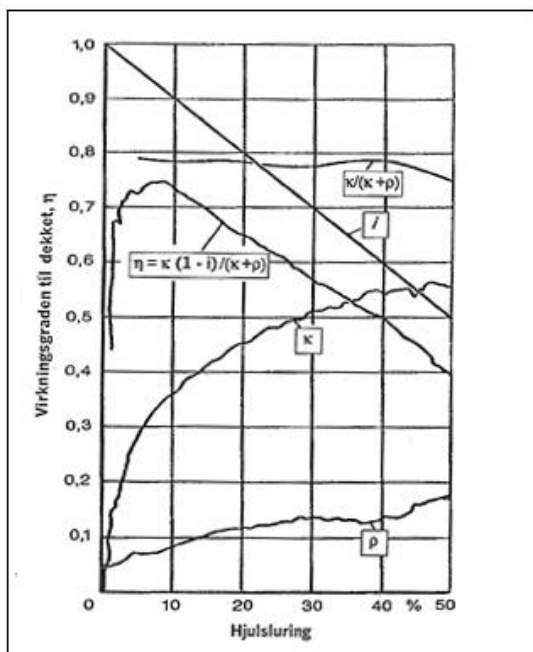
Resterende drivverk:

I flytdiagrammet vist i figur 2 er virkningsgradene til hoveddrivverket og kraftuttaksdrivverket oppgitt til å være henholdsvis: $\eta_{HVD} = 0,75 - 0,90$ og $\eta_{KUD} = 0,95$. Tapene i drivverkene kommer i hovedsak av friksjonstap.

Det er valgt å sette virkningsgraden til hoveddrivverket til å være midt mellom de oppgitte verdiene, altså $\eta_{HVD} = 0,83$. Den oppgitte virkningsgraden for kraftuttaksdrivverket vil bli brukt videre.

Hjulene:

Med virkningsgraden til hjulene menes virkningsgraden i overføringen av effekt fra hjul til underlag, altså til trekkeeffekten til traktoren. Denne avhenger av hjulgrepet, rullemotstanden og sluringstapene. Variasjonen i virkningsgraden som funksjon av disse tre egenskapene er vist i grafen i figur 5.



Figur 5: Graf som viser variasjonen i virkningsgraden for overføring av effekt mellom hjul og underlag. Hentet fra ³³.

Figur 5 viser at virkningsgraden til hjulene varierer med koeffisientene κ , i og ρ . Koeffisientene er forklart i vedlegg 1, og står for graden av tapt hjulgrep (κ), graden av rullemodstand (ρ), og graden av sluring (i). Figuren viser også at man kan bestemme virkningsgraden til hjulene ut fra graden av sluring.

Sluring oppstår når kraften fra hjulene på underlaget blir for stor, slik at ikke all kraft går med på å trekke traktoren. Dette fører til at hjulene spinner mer enn de skulle, og det blir et tap av energi. Tapene går derfor til uutnyttete trekkrefter og varmeutveksling på grunn av rullemodstand.

Det er vanskelig å sette et generelt tall på hvor mye en traktor vil slure, og dermed hva virkningsgraden til hjulene vil være, da dette i svært stor grad er avhengig av lokale kjøreforhold. Det er i denne oppgaven valgt å sette virkningsgraden til hjulene til å være $\eta_{HJ} = 0,68$. Dette tilsvarer en sluring på godt under 20 %, som ikke er et urealistisk tall. ²⁹

2.1.3 Effekt- og virkningsgradsberegninger

Effekten og energien som leveres til en traktor kommer fra dieselen. Dieselforbruket til traktoren er beregnet ut fra verdiene gitt i vedlegg 2 med gjennomsnittsverdier. Mer informasjon om datagrunnlaget for dieselforbruket er gitt i delkapittel 4.1: Datagrunnlag for dieselforbruk ved ulike jordbruksprosesser.

Effekten, P_{inn} , som sendes inn i motoren i form av diesel, kan beregnes ved formelen:

$$P_{inn} = F_D \cdot BV \quad (1)$$

Hvor F_D er forbruket av diesel gitt i liter per time og BV er den nedre brennverdien til dieselen gitt i kWh per liter.

Brennverdien til diesel er $BV = 10,10$ kWh/L. ⁴

Som nevnt i forrige avsnitt, så må effektberegningene gjøres i to omganger, med og uten redskaper koblet til kraftuttaket. Formlene for disse beregningene vil bli gjennomgått under.

Effektberegninger uten redskaper koblet til kraftuttaket:

Når redskapene ikke benytter effekt fra kraftuttaket blir beregningene av effektflyten ganske enkel, ettersom effekten som levers til kraftuttaket, P_{KU} , blir lik null. Den totale nyttbare effekten levert ut fra traktoren, P_{utT} , og effekten levert ut fra hjulene, P_{HJ} , blir derfor den samme, og kan beregnes ved formelen:

$$P_{HJ} = P_{utT} = \eta_{HVD\ tot} \cdot P_{inn} \quad (2)$$

Hvor P_{inn} er effekten levert til motoren i form av diesel og $\eta_{HVD\ tot}$ er den totale virkningsgraden for hoveddrivverkkjeden fra og med motoren til og med hjulene.

Virkningsgraden, $\eta_{HVD\ tot}$, kan beregnes ved hjelp av formelen:

$$\eta_{HVD\ tot} = \eta_M \cdot \eta_G \cdot \eta_{HVD} \cdot \eta_{HJ} \quad (3)$$

Hvor η_M er virkningsgraden til motoren, η_G er virkningsgraden til girkassen, η_{HVD} er virkningsgraden til det resterende hoveddrivverket og η_{HJ} er virkningsgraden til hjulene.

Den totale virkningsgraden til traktoren, η_{totT} , når det ikke er koblet noen redskaper til kraftuttaket er lik $\eta_{HVD\ tot}$.

Effektberegninger med redskaper koblet til kraftuttaket:

Når redskapene benytter kraftuttaket, sendes effekt i to retninger fra motoren: gjennom hoveddrivverket til hjulene og gjennom kraftuttak-drivverket til kraftuttaket. Fordelingen av effekt på kraftuttaksdrivverket og hoveddrivverket blir derfor viktig. Det vil i denne oppgaven bli tatt utgangspunkt i at fordeling av effekten fra motoren er på 70 % til kraftuttaket ($n_{KU} = 0,7$) og 30 % til hoveddrivverket ($n_{HVD} = 0,3$).

Den totale nyttbare effekten som leveres fra traktoren, P_{utT} , er derfor gitt av formelen:

$$P_{utT} = P_{KU} + P_{HJ} \quad (4)$$

Hvor P_{KU} er effekten som leveres til kraftuttaket og P_{HJ} er effekten som leveres ut fra hjulene til bakken.

Effekten levert til kraftuttaket, P_{KU} , kan beregnes ved hjelp av formelen:

$$P_{KU} = n_{KU} \cdot \eta_{KUD\ tot} \cdot P_{inn} \quad (5)$$

Hvor n_{KU} er andelen av effekten som leveres fra motoren som går ut på kraftuttaksdrivverket, $\eta_{KUD\ tot}$ er den totale virkningsgraden for kraftuttaks-drivverket fra og med motoren til kraftuttaket og P_{inn} er effekten fra dieselen.

Den totale virkningsgraden til kraftuttaksdrivverket, $\eta_{KUD\ tot}$, kan beregnes ved hjelp av formelen:

$$\eta_{KUD\ tot} = \eta_M \cdot \eta_{KUD} \quad (6)$$

Hvor η_M er virkningsgraden til motoren og η_{KUD} er virkningsgraden til kraftuttaksdrivverket.

Effekten levert til hjulene, P_{HJ} , kan beregnes ved hjelp av formelen:

$$P_{HJ} = \eta_{HVD} \cdot \eta_{HVDtot} \cdot P_{inn} \quad (7)$$

Hvor η_{HVD} er andelen av motoreffekten som leveres til hoveddrivverket, η_{HVDtot} er den totale virkningsgraden på hoveddrivverket funnet ved formel 3 og P_{inn} er effekten fra dieselen.

Den totale virkningsgraden til traktoren, η_{totT} , når redskaper er koblet til kraftuttaket er gitt som:

$$\eta_{totT} = \eta_{KU} \cdot \eta_{KUDtot} + \eta_{HVD} \cdot \eta_{HVDtot} \quad (8)$$

Hvor η_{KU} er andelen av effekten som leveres fra motoren som går ut på krafttuttsdrivverket, η_{KUDtot} er den totale virkningsgraden for krafttuttsdrivverket fra og med motoren til kraftuttaket, η_{HVD} er andelen av motoreffekten som leveres til hoveddrivverket og η_{HVDtot} er den totale virkningsgraden på hoveddrivverket.

Det er effektene beregnet ved formlene 2, 4, 5 og 7 som er utgangspunkt for dimensjonering av den elektriske traktoren og hydrogentraktoren.

2.2 Batteritraktoren

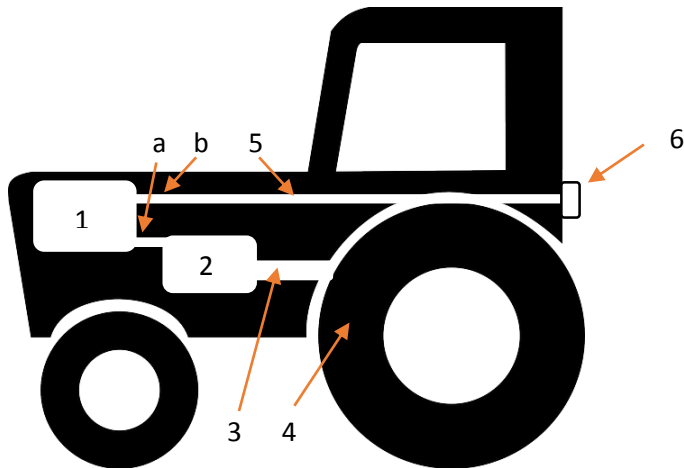
2.2.1 Oppbygningen av batteritraktoren

Før det kan gjøres beregninger på den batteridrevne traktoren, må oppbygningen av traktoren gjennomgås. Oppbygningen av den batteritraktoren har likhetstrekk med dieseltraktoren, men noen av komponentene må byttes ut.

Endringene som må gjøres er listet opp under:

- Dieseltanken må byttes ut med batterier, med mulighet til å skifte ut batteriene på en enkel måte.
- Dieselmotoren må erstattes med en elektrisk motor, og girene kan fjernes.
- Krafttuttsdrivverket må byttes ut med elektrisk overføring av effekt med en stikkontakt bak på traktoren til påkobling av redskaper. Den elektriske krafttutts-kabelen kan gå direkte fra batteriet, og vil derfor ikke gå fra motoren som i dieseltraktoren.
- Mellom batteri og motor, og mellom batteri og elektrisk kraftuttak må det være styringsenheter for å styre/endre strøm og spenning ut fra batteriet.

Det at kraftuttaket blir elektrisk gjør at redskapene som får mekanisk effekt fra kraftuttaket ved bruk av en dieseltraktor, må ha en egen elektrisk motor og mulighet til å kobles til det elektriske kraftuttaket. Ut fra endringene som må gjøres er figur 6 satt opp.



Figur 6: Oversiktsbilde over batteritraktoren, med nummerering for de ulike delene. Bildet er hentet fra ³⁴ og redigert.

Elektrisitet blir hentet ut av batteriet (1) gjennom to elektriske uttak med elektriske omformere (a og b). Den elektriske effekten fra omformer (a) blir sendt inn i den elektriske motoren (2), hvor den elektriske effekten fra batteriet blir omgjort til mekanisk effekt og sendt ut på hoveddrivverket (3). Hoveddrivverket og hjulene (4) er bygd opp likt for den elektriske traktoren og dieseltraktoren. Fra den andre elektriske omformeren (b) går elektrisk effekt til den elektriske overføringskabelen (5) og videre til stikkontakten (6) bak på traktoren. Det vil i denne oppgaven bli tatt utgangspunkt i denne enkle oppkoblingen her.

Figur 6 viser at effekten fra batteriet fordeler seg på to elektriske uttak: til motoren som leverer effekt til traktorhjulene og gjennom en overføringskabel som leverer effekt til det elektriske kraftuttaket. Fordelingen av effekt fra batteri til kraftuttaks-stikkontakten og hoveddrivverket er derfor viktig. Denne fordelingen antas i denne oppgaven til å være lik for de elektriske traktorene og dieseltraktoren.

2.2.2 Komponentene i batteritraktoren

Ettersom den batteridrevne traktoren med oppbygningen gitt i figur 6 har det samme drivverket og hjulløsning som dieseltraktoren vil disse virkningsgradene være like for de to traktorene. Bakgrunnen for virkningsgradene som settes for de elektriske komponentene er gitt under.

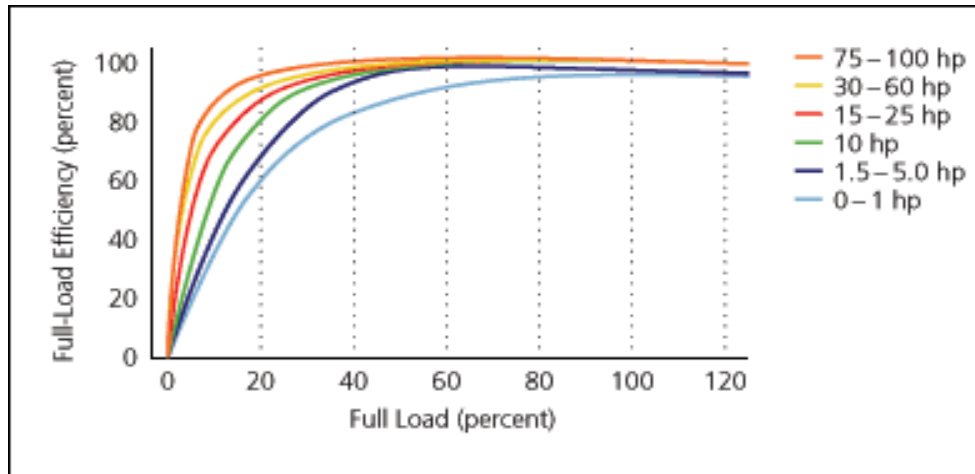
Omformeren:

Figur 6 viser at det er to elektriske omformere i traktoren: en mellom batteri og motor og en mellom batteri og overføringskabelen. Elektriske omformere har generelt en høy virkningsgrad i et vidt spekter av spenninger og strømmer. Tapet i denne komponenten kan ifølge kilde ³⁵ antas å være på mellom 1 – 3%. Dette gir en virkningsgrad på mellom 97 % og 99 %. Virkningsgraden til omformeren er i denne oppgaven satt til å være $\eta_o = 0,98$.

Elektrisk motor:

Det er ikke fokus på hvilken motor som skal velges eller effekten til motoren i denne oppgaven. Det er mange muligheter for valg av elektrisk motor til elektriske kjøretøy, og motoren bør velges ut fra de kravene som det er valgt å sette for traktoren.

Merkelasten til en motor er den merkeeffekten som er oppgitt for motoren. Virkningsgraden til en elektrisk motor varierer med hvor mye av merkelasten som brukes, og motoren lages derfor som regel for å brukes i området mellom 50% og 100% av merkelasten. Dette betyr at de elektriske motorene har en relativt god virkningsgrad i dette området.³⁶ Dette kan sees fra figuren 7.



Figur 7: Viser variasjonen i virkningsgraden til en elektrisk motor med varierende last. Hentet fra³⁷.

Tapene i en elektrisk motor kommer i hovedsak av ohmske tap i ledere, jerntap i armatur og friksjonstap.

Fra kilde^{38*} er det funnet at den minimale virkningsgraden til elektriske motorer med merkeeffekter i området 90-110 kW etter europeiske standarder skal ligge i området mellom 0,940 og 0,954. Virkningsgraden til motoren vil i denne oppgaven settes noe lavere enn det den vil være i virkeligheten, da denne virkningsgraden også vil dekke for tap av elektrisk effekt til underforbrukere. Virkningsgraden er derfor satt til å være $\eta_{EM} = 0,95$ i denne oppgaven.

Elektrisk kraftuttak:

Kraftuttaket er elektrisk for de elektriske traktorene, og tapene vil derfor være i omformeren, overføringskabel og stikkkontakten. Dersom det tas utgangspunkt i Fendt sitt elektriske kraftuttak på traktoren de lanserte i 2013, vil overføringen ha en spenning på 700 V DC.²⁰ Strømmen i overføringskabelen vil da bli så lav at tapene i selve overføringskabelen er neglisjerbar. I utgangspunktet vil det heller ikke være tap i stikkkontakten. Tapene vil i så fall skyldes slitasje på de ledende elementene som er i kontakt med hverandre, på grunn av vibrasjon i traktoren eller hvis gjørme eller fukt har kommet inn i kontakten. Disse tapene vil i så fall være så små at virkningsgraden vil være på over 99,9%.³⁹ Det er derfor sett bort fra tapene i stikkkontakten også. De eneste tapene i kraftuttaket er dermed de i omformeren, og virkningsgraden til det elektriske kraftuttaket vil derfor være lik: $\eta_{Eku} = 1$.

* Kilde 38 er ved innlevering av denne oppgaven ikke lenger i bruk. Kilden har blitt sperret og krever nå brukernavn og passord. Link til innloggingsside med informasjonen brukt fra kilde 38 kan bli funnet mot bunnen av nettsiden gitt av kilde⁴⁰.

Batteri:

Teorien bak batterier er i hovedsak hentet fra ⁴¹, dersom andre kilder er brukt vil disse oppgis i teksten.

Valg av batteri er en viktig del av planleggingen av den batteridrevne traktoren. Dette skyldes at batteriet er den delen av traktoren som vil ha kortest levetid, og er derfor den mest kritiske komponenten til den batteridrevne traktoren. ⁸ Det er derfor viktig å velge et batteri med høyt nok energiinnhold, lang levetid, mange ladesykler og som tåler forholdene det skal brukes under.

Det er tenkt at batteripakken skal kunne byttes ut i løpet av dagen, og det er derfor behov for flere batteripakker. Batteripakken som velges kan derfor mindre enn hvis en batteripakke skulle brukes hele dagen.

Virkningsgraden til et batteri er gitt som forholdet mellom energien som tilføres batteriet ved oppladning og energien som avgis fra batteriet ved utladning. Energitalpene i et batteri skyldes i hovedsak to prosesser i batteriet:

- Coulombeffekten: Innebærer tapet av elektrisk strøm på grunn av reaksjoner inne i cellen, hvor reaksjonene krever elektroner eller hindrer elektroner i å frigjøres. Eksempler på slike reaksjoner er oppløsning av elektrolytten, også kalt gassing, og korrosjon av elektrodematerialet.
- Voltaisk effekt: Spenningen som kreves for å lade opp et batteri er høyere enn celledspenningen som er ved utladning av batteriet. Dette skyldes indre resistanser i og polarisering av materialene inne i batteriet.

Produktet av virkningsgradene fra coulombeffekten og voltaisk effekt gir den totale virkningsgraden til batteriet.

Det er ikke fokus på hvilken batteripakke som bør brukes i denne oppgaven, men det er tatt utgangspunkt i at det er Teslas batteripakker som brukes. Teslas beste batteripakker i dag er på 85 kWh, og kan levere 80 kWh energi. Det er tenkt at to slike batteripakker kan slås sammen til en batteripakke på 170 kWh, som kan levere 160 kWh. ⁴² Teslas batteripakker er satt sammen av flere litium-ion batterier, og typiske virkningsgrader for slike batterier er på mellom 80 % og 90 %. ⁴³ Virkningsgraden til batteripakken til traktoren er derfor satt til å være på $\eta_B = 0,86$ i denne oppgaven.

2.2.3 Effekt- og virkningsgradsberegninger

Beregningene for effekt og tap for batteritraktoren har mange likhetstrekk med beregningene for dieseltraktoren. De store forskjellene skyldes at noen av komponentene i dieseltraktoren er skiftet ut med elektriske komponenter, og at det ikke er noen girkasse i den batteridrevne traktoren. I tillegg til dette vil effekten som sendes ut på kraftuttaksdrivverket komme direkte fra batteriet, og ikke fra motoren som den gjør i dieseltraktoren.

Beregningene for den batteridrevne traktoren vil derfor være lik som i formel 2, 4, 5 og 7. Formlene for virkningsgradene til den batteridrevne traktoren er gjennomgått under.

Total virkningsgrad med redskaper koblet til kraftuttaket:

Den totale virkningsgraden til den batteridrevne traktoren, η_{totT} , når redskaper er koblet til krafttuttaksstikkontakten er gitt ved:

$$\eta_{totT} = \eta_B \cdot \eta_O \cdot (\eta_{HVD} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{HVD} \cdot \eta_{HJ} + n_{KU} \eta_{Eku}) \quad (9)$$

Hvor η_B er virkningsgraden til batteripakken, η_O er virkningsgraden til omformerne, η_{HVD} er andelen av effekten som sendes ut på hoveddrivverket, η_{EM} er virkningsgraden til den elektriske motoren, η_{HVD} er virkningsgraden til drivverket fra motoren til hjulene, η_{HJ} er virkningsgraden til hjulene, n_{KU} er andelen av effekten som sendes ut på krafttuttakskabelen og η_{Eku} er virkningsgraden fra batteri til stikkontakten bak på traktoren.

Total virkningsgrad uten redskaper koblet til kraftuttaket:

For den batteridrevne traktoren uten redskaper koblet til kraftuttaket, kan den totale virkningsgraden til traktoren, η_{totT} , regnes ut som:

$$\eta_{totT} = \eta_B \cdot \eta_O \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{HVD} \cdot \eta_{HJ} \quad (10)$$

Hvor η_B er virkningsgraden til batteripakken, η_O er virkningsgraden til omformeren, η_{EM} er virkningsgraden til den elektriske motoren, η_{HVD} er virkningsgraden til drivverket fra motoren til hjulene og η_{HJ} er virkningsgraden til hjulene.

Effekt- og energiberegninger batteri:

For å finne effektbehovet til batteriene i traktoren må utregningene gå andre veien enn for dieseltraktoren, altså fra hjul og kraftuttak til batteri. Effektbehovet, P_B , kan derfor bli funnet ved hjelp av formelen:

$$P_B = \frac{P_{EM}}{\eta_{EM} \cdot \eta_O} + \frac{P_{Eku}}{\eta_{Eku} \cdot \eta_O} \quad (11)$$

Hvor P_{EM} er effekten ut av den elektriske motoren, η_{EM} er virkningsgraden til den elektriske motoren, η_O er virkningsgraden til omformerne, P_{Eku} er effekten som skal leveres ved det elektriske kraftuttaket og η_{Eku} er virkningsgraden til det elektriske kraftuttaket.

For å finne ut hvor mange batteripakker det er nødvendig å bruke gjennom en arbeidsdag, er det nødvendig å sette et mål på hvor mange timer traktoren skal brukes i løpet av en dag. Daglig brukstid for traktoren er i denne oppgaven satt til å være 12 timer. Energibehovet fra batteriene, E_B , ved 12 timers kjøring for de ulike jordbruksprosessene kan dermed bli funnet ved hjelp av formelen:

$$E_B = P_B \cdot t \quad (12)$$

Hvor P_B er effekten som trekkes fra batteriet og t er antall timer traktoren skal brukes i løpet av et døgn.

Når energien som er tilgjengelig per batteripakke er kjent kan man dermed finne antall batteripakker, $\#_B$, ved formelen:

$$\#_B = \frac{E_B}{E_{B,pak}} \quad (13)$$

Hvor E_B er energien som trekkes fra batteripakken i løpet av en dag, og $E_{B,pak}$ er energien i en batteripakke.

2.2.4 Spesialtraktor: Elektrisk Nav-traktor

Med en elektrisk traktor er det muligheter for å bygge opp traktoren annerledes enn slik den konvensjonelle dieseltraktoren er bygget opp i dag. Det vil i denne oppgaven bli sett på en av mulighetene: bruken av Nav-motorer.

En elektrisk Nav-traktor er en batteridrevet traktor med en elektrisk motor i hvert av hjulene. En slik type motor kalles en navmotor fordi den plasseres på navet til hjulet. Ved å bruke slike motorer vil hvert hjul kunne styres forskjellig, noe som gjør at trekraften til hvert av hjulene kan være forskjellig.⁴⁴ I tillegg til dette kan girkasse og drivverk fjernes, og traktoren står i hovedsak igjen med batteripakken, omformere, noen mekaniske deler og en styringsenhet. Styringsenheten styrer hver av motorene for å samkjøre hjulene, samt å redusere effekttapene fra hjulene gjennom sluring. Oppsettet av traktoren blir dermed slik: En batteripakke overfører elektrisk effekt gjennom fem omformere til det elektriske kraftuttaket og til de fire elektriske motorene som er plassert inne i hvert sitt hjul. De elektriske navmotorene overfører mekanisk effekt til hvert sitt hjul gjennom de mekaniske delene.

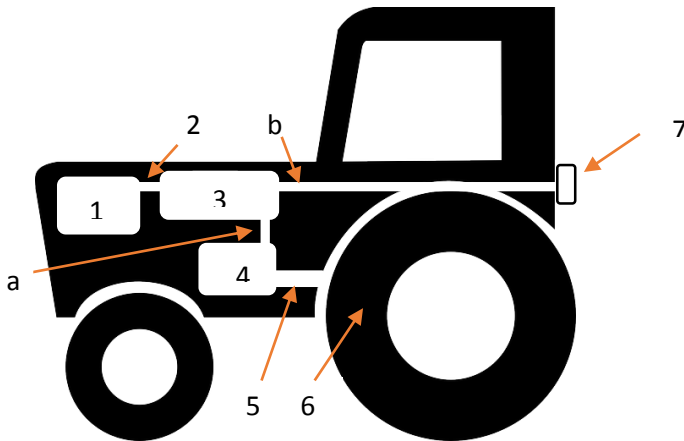
Det antas i denne oppgaven at tapene i de mekaniske delene er så små at de er neglisjerbare ($\eta_{HVD} = 1$). Siden denne oppbyggingen gjør det mulig å kontrollere hvor mye effekt som sendes til hjulene, antas det at sluringen vil kunne holdes til et optimalt nivå til enhver tid. Med optimalt nivå menes det nivået som gir høyest mulig virkningsgrad i effektoverføringen mellom hjul og underlag. Figur 6 viser at det optimale området er på rundt 8 % sluring, og at virkningsgraden til hjulene da blir på $\eta_{HJ} = 0,75$. De andre virkningsgradene til traktoren antas å være lik som for den vanlige elektriske traktoren, og beregningene for virkningsgraden til Nav-traktoren vil derfor følge formel 9 og 10.

2.3 Hydrogentraktoren

2.3.1 Oppsett av hydrogentraktoren

Oppbyggingen av hydrogentraktoren har mange likhetstrekk med batteritraktoren. Hydrogenet vil sendes fra en hydrogentank til en brenselcelle, og fra brenselcellen overføres elektrisk effekt. Endringen fra den batteridrevne traktoren vil derfor gå ut på å bytte ut batteriet med en hydrogentank og en brenselcelle. Redskaper koblet til kraftuttaket vil få elektrisk effekt direkte fra brenselcellen gjennom en omformer og stikkontakt, og trenger som for den batteridrevne traktoren å ha en egen elektrisk motor.

Ut fra endringene som må gjøres er oppbyggingen av hydrogentraktoren satt opp i figur 8.



Figur 8: Oversiktsbilde over den hydrogentraktoren, med nummerering for de ulike delene. Bildet er hentet fra ³⁴ og redigert.

Hydrogen blir hentet ut av hydrogentanken (1) gjennom et rør (2) til brenselcellen (3). Fra brenselcelle er det to elektriske uttak med omformere (a og b). Den elektriske effekten fra omformer (a) overføres til den elektriske motoren (4), hvor den elektriske effekten fra brenselcellen blir omgjort til mekanisk effekt og overført til hoveddrivverket (3). Hoveddrivverket og ut til hjulene (4) er bygd opp likt som for den elektriske traktoren og dieseltraktoren. Fra den andre elektriske omformeren (b) går elektrisk effekt gjennom den elektriske overføringskabelen til stikkkontakten (7) bak på traktoren. Det vil i denne oppgaven bli tatt utgangspunkt i denne enkle oppkoblingen her.

Figur 8 viser at oppbyggingen for hydrogentraktoren blir tilsvarende som for batteritraktoren i figur 6, med unntak av at batteriet er byttet ut med en hydrogentank og en brenselcelle. Utrekningene for den hydrogendrevne traktoren har derfor mange likhetstrekk med beregningene for den batteridrevne traktoren.

2.3.2 Komponentene i hydrogentraktoren

De fleste komponentene i hydrogentraktoren er allerede gjennomgått tidligere i denne oppgaven, og virkningsgraden til disse komponentene vil være lik som for batteritraktoren. I dette avsnittet vil det derfor bli fokus på brenselcellen og hydrogentanken.

Brenselcelle:

Teorien bak brenselceller er i hovedsak hentet fra kilde ⁴⁵, dersom andre kilder er brukt vil disse oppgis i teksten.

Det er mange valg for brenselceller som kan benyttes i en hydrogentraktor, og det vil ikke fokuseres på hvilken som skal brukes i traktoren i denne oppgaven. Brenselcellen som er mest brukt i hydrogenbiler i dag er av typen PEM brenselceller, og det vil derfor tas utgangspunkt i disse brenselcellene når det er behov for å vite hvilken type det er. ⁴⁶

En brenselcelle fungerer på mange måter som et batteri, sett bort fra at de aktive materialene i brenselcellen tilføres utenfra cellen. Det er derfor nødvendig med lagring av de aktive materialene på utsiden av selve brenselcellen. I tilfellet med hydrogenbrenselceller, er de aktive materialene hydrogen og oksygen. Fordelen med en slik brenselcelle er at man kan trekke oksygen direkte fra luft, og dermed spare lagringsplass da man kun trenger en lagringstank til hydrogenet.

Virkningsgraden til en brenselcelle, η_{FC} , er gitt av formelen:

$$\eta_{FC} = \mu_f \cdot \frac{V_c}{1,48 \text{ V}} \quad (14)$$

Hvor μ_f er andelen av de aktive stoffene som faktisk brukes i brenselcellen, V_c er spenningen over en enkelt brenselcelle i brenselcellestabelen og 1,48 er spenningen som ville stått over cellen hvis alt det aktive materialet hadde blitt brukt til å danne elektrisk energi (i henhold til HHV).

Tapene i en brenselcelle kan deles opp i to grupper: Spenningstap og tap av reaktanter. Tapene av reaktanter kommer av at ikke alt det aktive materialet blir utnyttet i brenselcellen, og at det derfor er en del av reaktantene som sendes ut av brenselcellen med avgassene.

Spenningstapene kan deles opp i fire grupper:

- Aktiveringstap: Skyldes av treg oppstart av reaksjoner inne i cellen.
- Brenselslekkasje og interne strømmer: Små elektronstrømmer vil gå gjennom elektrolytten, og derfor ikke bidra til strøm i den ytre kretsen. I tillegg til dette vil noe av det aktive materialet også kunne strømme gjennom elektrolytten, og dermed reagere direkte med det aktive materialet på den andre elektroden.
- Ohmske tap: Skyldes resistansen til elektroden og motstanden mot å føre over ioner i elektrolytten.
- Konsentrasjonstap: Konsentrasjonen av/deltrykket til aktivt materiale langs elektrodene vil avta etter hvert som de reagerer på elektrodene. Dette fører til at det vil være større tilgang på aktivt materiale ved inngangen av brenselcellen enn ved utgangen av brenselcellen.

Andelen av aktivt materiale som brukes, μ_f , har ifølge kilde ⁴⁵ en verdi på rundt 0,95, og er derfor satt til denne verdien i denne oppgaven. Spenningen per brenselcelle er i området 0,5 – 0,8 V når brenselcellen er i bruk og koblet til last. ⁴⁷ Spenningen er satt til å være $V_c = 0,65 \text{ V}$. Når disse verdiene er kjente kan man enkelt regne ut virkningsgraden til brenselcellen ved hjelp av formel 14.

Lagringstanker:

Komprimert gass:

Det er mulig å lagre hydrogen i gassform, og dette er den teknologien som brukes mest i hydrogendrevne kjøretøy i dag. I tankene som i dag brukes til biler er trykket på 700 bar, mens det for busser er på 350 bar. ⁶ Grunnen til denne forskjellen er at det er mye bedre lagringsplass på en buss enn det er i biler, og at det derfor ikke lønner seg å komprimere gassen like mye for bruk i buss. Massetettheten til hydrogen er svært lav, noe som fører til at vektprosenten (wt%) er på mellom 1 og 5,5 og den volumetriske kapasiteten er på 12 – 27 g/L for slike lagringstanker avhengig av trykket i tanken. ^{45, 48}

Det vil i denne oppgaven fokuseres på en 700 bar tank med komprimert gass, og for en slik tank er ifølge kilde ⁴⁸ den volumetriske kapasiteten lik $C_v = 26 \text{ g/L}$ og vektprosenten lik $\text{wt} = 5,20$.

Væske:

Hydrogen kan lagres som væske. For å få til dette må temperaturen være svært lav, helt nede i 22 K. ⁴⁵ Det er en svært energikrevende prosess å nedkjøle hydrogen til en slik temperatur, men man får lagret mer hydrogen per volum. Denne typen lagring brukes for noen typer hydrogenbiler i dag, hvor hydrogenet forbrennes i en forbrenningsmotor. Hydrogenet kan i en bil med forbrenningsmotor

brukes i flytende form, noe den ikke kan i en brenselcelle. Ved bruk av brenselceller må hydrogenet fordampes før bruk, noe som gir ekstra energitap i hydrogentraktoren.⁴⁹ På grunn av de store energitapene ved bruk av flytende hydrogen, vil det ikke bli lagt vekt på denne typen lagring i denne oppgaven.

Metallhydrid:

En metallhydridtank er en tank hvor hydrogenet lagres i metallstrukturer. Metallet i tanken er porøst, og har derfor store overflater i forhold til volumet av selve metallet. Ved overflaten til metallet vil hydrogenmolekylene, H_2 , dele seg til to hydrogenioner som legger seg inn i metallstrukturen. Frigjøring av hydrogenioner fra metallstrukturen krever tilførsel av energi, og det må derfor tilføres varme til tanken når hydrogen forbrukes. Energibehovet er avhengig av trykket i tanken, og er størst for lavtrykks metallhydrid tanker. Trykket i tanken bestemmes av hvilket metall som brukes, og har derfor en fast verdi for hver tank. Forsøk utført hos HYSTORSYS viser at varmen man kan overføre ved å ta i bruk en enkel varmeveksler mellom brenselcelle og metallhydridtank vil være nok til å dekke for dette energibehovet.⁶ Det vil derfor i denne oppgaven bli sett bort fra dette energibehovet, og det antas dermed at noe av den tapte energien i brenselcellen vil gå til energitilførsel til lagringstanken/- tankene.

Det vil bli sett på to løsninger for slike tanker i denne oppgaven: en med lavt trykk (rundt atmosfærisk trykk), og en med høyt trykk. Lagringskapasiteten til disse to løsningene er vist i tabell 1.

Tabell 1: Oversikt over lagringskapasitet, temperaturkrav ved hydrogenbruk og trykk for to ulike metallhydridtanker. Tallene er hentet fra kilde⁵⁰.

Egenskap	Lavtrykks metallhydrid	Høytrykks metallhydrid
Trykk [MPa]	< 1	35
Temperatur ved hydrogenforbruk [K]	> 308	> 243
Vektprosenten, Wt [%]	1,17	1,74
Volumetrisk kapasitet, C_v [g/L]	29,17	40,56

I tabell 1 er minstetemperaturen til tanken ved forbruk av hydrogen satt opp. Temperaturen ved en høytrykks lagringstank må være minst 243 K, dvs. - 30 °C, og ved en lavtrykks lagringstank må temperaturen være minst 308 K, dvs. 35 °C. Det vil derfor kun være behov for oppvarming ved bruk av lavtrykkstanken. Det vil i denne oppgaven bli sett på begge tankene fra tabell 1.

2.3.3 Beregninger for hydrogentraktoren:

Virkningsgraden til hydrogentraktoren:

Virkningsgraden til hydrogentraktoren kan beregnes ved hjelp av formel 9 og 10, hvor virkningsgraden til batteriet, η_B , byttes ut med virkningsgraden til brenselcellen, η_{FC} , gitt av formel 14. Lagringstanken har ikke noe tap i seg selv, og vil derfor ikke gi noe ledd i utregningen av virkningsgraden.

Hydrogenforbruk og lagringsbehov i traktoren:

Forbruket av hydrogen, F_{H_2} , kan beregnes ved hjelp av formelen under som gir forbruket i kg/s:

$$F_{H_2} = \frac{1}{\eta_{FC}} \cdot \frac{M_{H_2} \cdot P_E}{2 \cdot V_C \cdot F} \quad (15)$$

Hvor η_{FC} er virkningsgraden til brenselcellen, M_{H_2} er den molare massen til hydrogen, P_E er den elektriske effekten som skal trekkes fra brenselcellen, tallet 2 kommer av at det dannes 2 mol elektroner per mol hydrogen, V_C er spenningen over en brenselcelle i stabelen og F er Faradays konstant.

Det totale lagringsbehovet, LB_{H_2} , kan bli funnet ut fra hydrogenforbruket for et gitt antall timers forbruk ved formelen:

$$LB_{H_2} = F_{H_2} \cdot t \quad (16)$$

Hvor F_{H_2} er forbruket av hydrogen per sekund, og t er tiden traktoren skal være i bruk i sekunder.

Volum- og masseberegninger for hydrogentanken:

Dersom man vet volumet av tanken, kan lagringskapasiteten til tanken i form av hvor mange kg hydrogen som kan lagres i tanken beregnes ut fra formelen:

$$m_{H_2} = C_V \cdot V \quad (17)$$

Hvor C_V er den volumetriske lagringskapasiteten til tanken i gram pr liter og V er volumet av tanken i liter.

Den totale massen til tanken, $m_{H_2\text{-tank}}$, blir da:

$$m_{H_2\text{-tank}} = \frac{m_{H_2}}{W_t} \cdot 100\% \quad (18)$$

Hvor m_{H_2} er lagringskapasiteten for hydrogen i tanken gitt i kg og W_t er vektprosenten av hydrogen i tanken gitt i %.

Hvor mange ganger man må fylle tanken i løpet av en 12 t dag, $\#_{H_2}$, blir derfor funnet ved hjelp av formelen:

$$\#_{H_2} = \frac{LB_{H_2}}{m_{H_2}} \quad (19)$$

Hvor LB_{H_2} er lagringsbehovet for hydrogen gitt i kg og m_{H_2} er lagringskapasiteten til tanken gitt i kg hydrogen.

I en hydrogenbil har hydrogentanken en typisk størrelse på mellom 120 L og 180 L.⁵⁰ Det vil derfor i denne oppgaven bli tatt utgangspunkt i at det er plass til en hydrogentank som har et volum på 200 L i hydrogentraktoren, som er litt større enn det som er i hydrogenbilen.

3 Solenergi, ladestasjon og hydrogenlagring

I dette kapitlet blir teorien og fremgangsmåten for beregninger av virkningsgrader og energiproduksjon og – flyt i PV-anlegget, ladestasjon og hydrogenproduksjonsstasjon gjennomgått. Oppsettet for disse anleggene vil også bli gjennomgått i korte trekk.

3.1 Solenergi

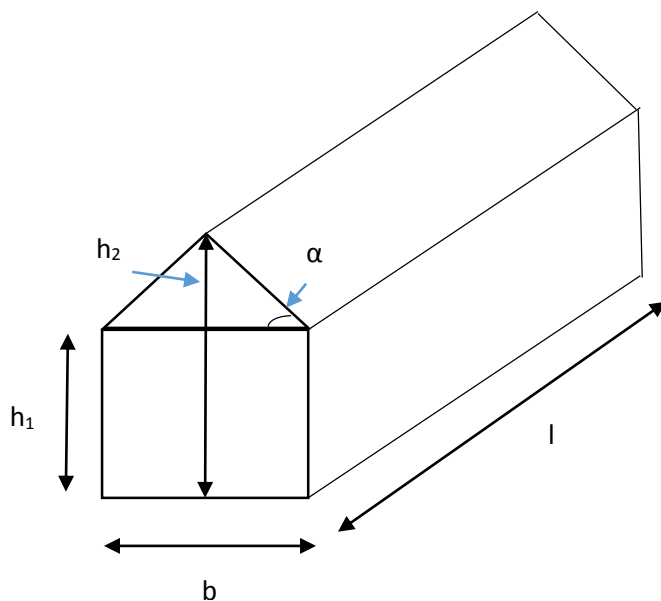
3.1.1 Simulering av solenergi i PVsyst

Simuleringene for solenergi ble utført i PVsyst. Valg av programvare for simuleringene er gjort på bakgrunn av to ting: Det er denne programvaren som er brukt ved tidligere masteroppgaver ved NMBU, og flere bedrifter bruker denne programvaren i sine simuleringer. Det er ikke gjort undersøkelser på andre programvarer som er tilgjengelige på markedet før denne programvaren ble valgt. PVsyst bruker data fra Meteonorm 6.1 til simuleringen, som vil bli gjennomgått i avsnitt 4.2: Datagrunnlag for simulering av solenergi: Meteonorm 6.1.

3.1.2 Informasjon om låvene det blir sett på i denne oppgaven.

Låvens dimensjoner:

Tegnsettingen for viktige dimensjoner for låven er vist i Figur 9.



Figur 9: Oversiktsbilde over låven brukt til simuleringen av solenergi, med viktige dimensjoner påtegnet.

Det er vanskelig å sette mål på typiske låver, da dimensjonene varierer fra gård til gård. Det vil i denne oppgaven bli tatt utgangspunkt i driftsbygg til gårdsbruk med 50 melkekyr. Dette gir ifølge kilde ⁵¹ to sett med mål for låven, en for eldre låver og en for nybygde låver, som er vist i tabell 2.

Tabell 2: Typiske mål for eldre og nyere låvebygg for gårder med 50 melkekyr. ⁵¹

	Eldre låve	Nyere låve
Lengde (l)	49 – 52 m	49 – 52 m
Bredde (b)	10 – 15 m	20 – 22 m
Høyde 1 (h ₁)	5,4 – 6 m	2,7 – 3 m
Høyde 2 (h ₂)	10 – 11 m	7 - 8 m
Takvinkel (α)	30° - 35°	20° - 22°

Det er i denne oppgaven satt fokus på eldre låver, og målene som ble brukt var: $l = 52$ m, $b = 14$ m, $h_1 = 6$ m, $h_2 = 10,4$ m, $\alpha = 33^\circ$. Dette gir et tilgjengelig takareal på 430 m² på hver av de to takflatene, sett bort fra eventuelle takareal som strekker ut over veggene.

Det antas at man ikke kan bruke hele takarealet til modulene. Dette fordi det kan være ventilasjonssystemer eller annet som stikker opp på taket, det må være plass til håndtering av snø og at det kan være vektbegrensninger på taket. Det er derfor satt til et tilgjengelig takareal på 380 m² på hver takflate i simuleringen, som er litt i underlag av 90 % av det tilgjengelige takarealet. På grunn av modulenes dimensjoner blir det faktiske modularealet noe mindre enn det tilgjengelige arealet på 380 m².

Omgivelsene til låven:

Omgivelsene til en låve er forskjellige fra gård til gård, og det blir derfor sett bort fra dette i hovedsimuleringene denne oppgaven. Dersom det er bygg, trær eller bakker/fjell i nærområdet til gården vil dette gi skyggelegging på solmodulene, og dermed gi redusert produksjon av elektrisitet i et gitt tilfelle. Det vil bli sett på skyggelegging som et par spesialtilfeller, og disse er forklart videre i delkapittel 3.1.3: Simuleringer av spesialtilfeller i PVsyst.

Områder:

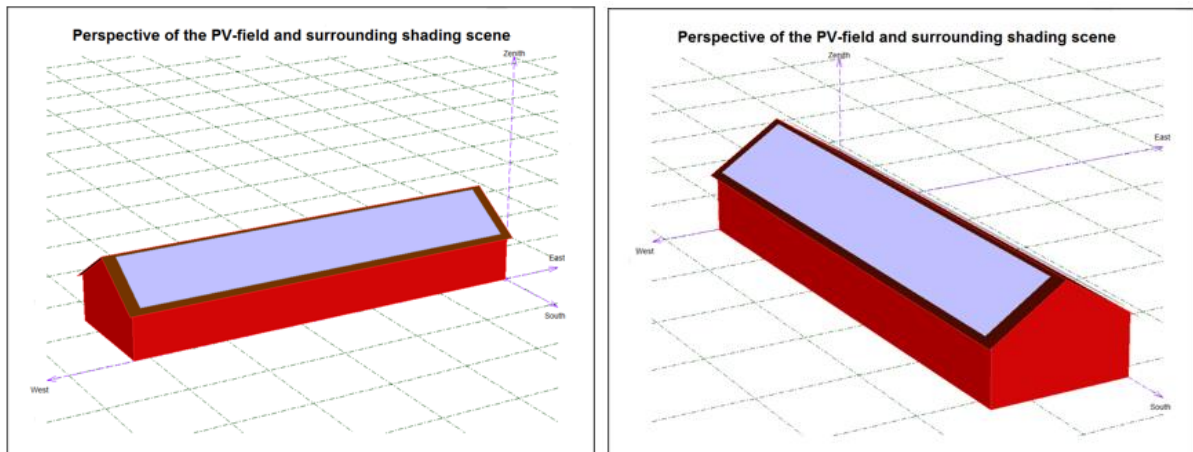
Plasseringer av låvene med solcelleanlegg er i denne oppgaven satt til områder hvor det er mye jordbruk, og med en spredning rundt om i Norge. Det er valgt å se på fire områder:

- Troms: Balsfjord (koordinater: 69.32, 19.30)
- Nord-Trøndelag: Verdal (koordinater: 63.8, 11.54)
- Rogaland: Sola (koordinater: 58.87, 5.66)
- Akershus: Ås (koordinater: 59.65, 10.76)

Plassering av moduler:

Det vil for hvert av områdene bli sett på to låver: en med nord- og sørvendt tak, og en med øst- og vestvendt tak. På det nord-/sørvendte taket vil det bare plasseres moduler på den delen av taket som vender sørøver, og takarealet blir derfor bare halvparten så stort som for det øst-/vestvendte taket hvor det plasseres moduler på begge takflater.

Oppsett av moduler blir vist i figur 10, hvor bildet til venstre viser den nord-/sørvendte låven og bildet til høyre viser den øst-/vestvendte låven.



Figur 10: Oppsett av solcellemoduler på låvetaket. Til venstre: nord-/sørvendt låve, til høyre: øst-/vestvendt låve.

Oppkobling frem til fordelingsboks:

Modulene vil kobles i serie og parallell. De seriekoblede modulene kalles strenger, og antall strenger tilsvarer antallet strenger som er koblet i parallell. Seriekobling av moduler fører til økt spenning og parallellkobling av moduler fører til økt strøm. Det er i denne oppgaven brukt 12 moduler i serie, og 19 strenger i parallell for alle simuleringer, sett bort fra noen av spesialtilfellene. Der dette oppsettet av moduler ikke er brukt vil det spesifiseres i teksten.

Modulene kobles til vekselrettere som gjør likestrøm om til vekselstrøm. Det finnes tre hovedtyper vekselrettere:

- Sentralvekselretter: Alle modulene sender effekt til samme vekselretter.
- Strengvekselrettere: Hver streng sender effekt til en vekselretter, og antallet strenger er derfor lik antallet vekselrettere.
- Mikrovekselrettere: Hver modul sender effekt til hver sin vekselretter. Antallet moduler og antallet vekselrettere er derfor den samme.

I hovedsimuleringene er det brukt strengvekselrettere, som er det vanligste å bruke på PV-anlegg i dag. Sentralvekselrettere brukes gjerne i større anlegg, da dette fører til et enklere system og lavere investeringskostnader. Bakdelen ved bruk av sentralvekselrettere er at PV-anlegget ved skyggelegging av moduler vil få de største produksjonstapene sammenlignet med bruk av de andre vekselretterne, DC delen av systemet blir sensitivt for feilstrømmer og systemet blir sensitivt for feil på vekselretteren. Mikrovekselrettere brukes gjerne for mindre anlegg, og er mindre sensitivt for skyggelegging av moduler. Virkningsgraden til mikrovekselretterne er lavere enn for strengvekselretteren, gir en høyere investeringskostnad for anlegget og har et høyere behov for vedlikehold.⁵²

Fra vekselretterne går strømmen til en fordelingsboks, hvor strømmen kan sendes videre til lade-/hydrogenstasjon, nett eller til bygninger på gården.

Det vil bli sett på et slikt enkelt anlegg i denne oppgaven, hvor det er sett bort fra alle kontroll- og optimaliseringskomponenter. Effekten fra vekselretterne er derfor den samme som den som sendes til fordelingsboksen.

Informasjon til simuleringsprogramvaren:

For å kunne utføre en god simulering i PVsyst, må en rekke parametere utover dimensjonene til låven oppgis. Dette for bl.a. å kunne beregne tapene i systemet som settes opp. Programvaren har innebygde verdier for de fleste parameterne som brukes, men det er i noen tilfeller behov for å tilpasse dem til norske forhold. Under blir det gjort en kort gjennomgang av parameterne som er endret i simuleringene utført i denne oppgaven.

Minimumstemperatur for moduler: Denne er satt til -20°C for alle områdene som det blir sett på i denne oppgaven, for å være sikker på at utetemperaturene ikke blir lavere enn begrensningen til PV-modulene.

Tap på grunn av snø på modulene: I PVsyst er det en innstilling man kan gjøre for «Soiling loss». Denne brukes som regel for å beregne tap på grunn av støv eller sand på modulene, men i land med snø brukes denne for å beregne tap på grunn av snølag på modulene. I PVsyst sin brukermanual er det anbefalt å bruke at 50 % av det totale modularealet dekt med snø i vintermåned, men det er i denne oppgaven tatt utgangspunkt i tall fra Multiconsult. Tallene er hentet fra kilde⁵³ og en oversikt over Multiconsults tall er satt opp i tabellen i vedlegg 3.

Verdiene som brukes for snødekke fordelt på områdene som det blir sett på i denne oppgaven er vist i tabell 3.

Tabell 3: Oversikt over prosentandelen av modularealet som er dekket av snø hver måned for de ulike områdene.

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Des
Balsfjord	90	90	60	20	0	0	0	0	0	0	0	60
Verdal	70	70	40	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Sola	70	70	40	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Ås	70	70	40	0	0	0	0	0	0	0	0	50

Albedo: Albedo er den andelen av innstrålingen som reflekteres når innstrålingen treffer en flate. I PVsyst er det innstillinger for å legge inn albedoen til bakken. Dette fordi reflektert stråling fra bakken vil kunne treffe modulene, og dermed gi en økning i den produserte energien fra PV-anlegget. Albedoen til bakken er i PVsyst satt til å være 0,2, men det er anbefalt i PVsyst brukermanual å endre den til 0,8 for måneder med mye snø på omliggende områder. På bakgrunn av Multiconsults tabell for snø på modulene (kilde⁵³ og vedlegg 3) og målinger for albedo ved FAGKLIM målestasjon i Ås (kilde⁵⁴) er albedoen satt opp som vist i figur 4.

Tabell 4: Oversikt over albedoverdier for bakken for hver måned ved de ulike områdene.

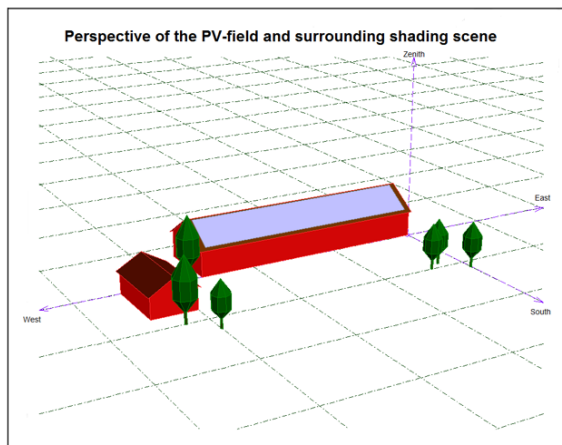
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Des
Balsfjord	0,70	0,70	0,60	0,30	0,24	0,23	0,22	0,23	0,24	0,24	0,30	0,60
Verdal	0,62	0,68	0,53	0,27	0,24	0,23	0,22	0,23	0,24	0,24	0,30	0,48
Sola	0,62	0,68	0,53	0,27	0,24	0,23	0,22	0,23	0,24	0,24	0,30	0,48
Ås	0,62	0,68	0,53	0,27	0,24	0,23	0,22	0,23	0,24	0,24	0,30	0,48

3.1.3 Simulering av spesialtilfeller i PVsyst

Det vil i denne oppgaven bli sett på fem spesialtilfeller. Alle tilfellene tar utgangspunkt i simuleringen for Ås, med sørvendt tak.

Spesialtilfelle 1: Nærliggende skyggelegging av låven

Det første tilfellet er hvor låvebygningen ligger på et gårdstun med et bolighus og noen trær. Det vil bli tatt utgangspunkt i den eldre gårdsbygningen i denne simuleringen, og oppsettet brukt i dette tilfellet blir dermed som vist i figur 11.



Figur 11: Oversiktsbilde av låven og området rundt brukt i spesialtilfelle 1.

Spesialtilfelle 2: Skyggelegging fra fjell/bakke langt unna låven

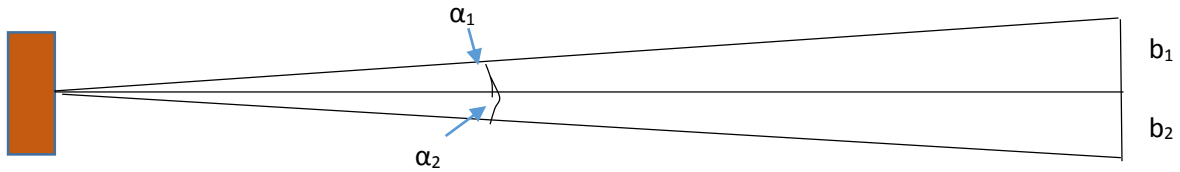
Det andre tilfellet er med fjell/bakker i området rundt bygningen, altså skyggelegging av objekter som er langt unna låven. Det vil bli tatt utgangspunkt i den eldre gårdsbygningen i denne simuleringen, og oppsettet blir derfor som for sørvendt bygning i hovedsimuleringene. For denne simuleringen må det legges inn høydevinkel og asimutvinkel for fjellet/bakken som skygger for solanlegget.

Høydevinkelen, h' er vinkelen mellom en rett strek ut fra låvens bunn, og en rett strek fra låvens bunn til toppen på fjellet/bakken. Høydevinkelen til en bakketopp med høyden h en avstand l fra låven er som vist i figur 12.



Figur 12: Viser definisjonen av høydevinkelen, h' , til fjerne skyggeleggere.

For å få et tredimensjonalt bilde av hvordan skyggeleggingen er, må man også legge inn bredden av fjellet/bakken. Dette gjøres ved hjelp av asimutvinkelen, α , som er vinkelen fra direkte sørlig retning ut fra låven til enden av fjellet/bakken. Asimutvinkelen er vist i figur 13.



Figur 13: Viser definisjonen av asimutvinkelen til fjerne skyggeleggere. Figuren er tegnet fra oversiden av låven.

Dersom fjellet/bakken har en topp rett frem (rett sør) vil asimutvinkelen være 0° . Er den øst for bygningen vil asimutvinkelen være negativ, og α_1 i figur 13 er derfor negativ. Er den vest for bygningen vil den være positiv, og α_2 i figur 13 er derfor positiv.

I denne simuleringen ble det brukt en bakke med en topp på 300 meters høyde, en avstand på 500 meter unna bygningen rett sør for bygningen, og med sidekanter på 100 meters høyde en bredde (b_1 og b_2 i figur 16) på 182 m på hver side av toppen. Dataene som ble lagt inn i PVsyst for å simulere fjelltoppen er oppgitt i tabell 5.

Tabell 5: Verdier lagt inn i simuleringen i PVsyst for spesialtilfelle 2: Fjern skyggelegging.

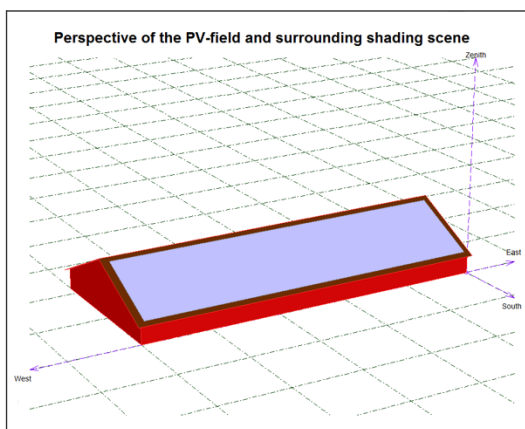
Asimutvinkel, α	Tilsvarende bredde fra sørlig retning, b	Høydevinkel, h'	Tilsvarende høyde 500 m unna, h
0°	0 m	31°	300 m
20°	182 m	11°	100 m
-20°	182 m	11°	100 m

Spesialtilfelle 3: Nyere låver

I det tredje spesialtilfellet er det tatt utgangspunkt i den nyere låven. Målene brukt til dimensjonene av denne låven er: $l = 50$ m, $b = 22$ m, $h_1 = 2,8$ m, $h_2 = 8$ m, $\alpha = 25^\circ$.

Dette gir et tilgjengelig takareal på 610 m^2 på hver av de to takflatene, sett bort fra takareal som strekker over veggene. Det er i denne simuleringen satt et tilgjengelig takareal på 540 m^2 , som er litt i underlag av 90 % av det tilgjengelige takarealet. Dette takarealet vil ikke dekkes helt av PV-moduler, på grunn av dimensjonene til modulene.

Oppsett med PV-moduler på låvetaket er vist i figur 14.



Figur 14: Oversiktsbilde over låven brukt til simuleringen av spesialtilfelle 3: Nyere låver.

Spesialtilfelle 4: Mikrovekselrettere

I dette spesialtilfellet vil det bli tatt i bruk mikrovekselrettere, altså en veksleretter per modul og kun en modul i serie. For at det skal bli like mange moduler i dette anlegget som det i hovedsimuleringen, er det brukt en modul i serie og 228 moduler i parallell.

Spesialtilfelle 5: Sentralveksleretter

I dette tilfellet blir det tatt i bruk en sentralveksleretter, altså en veksleretter på hele anlegget. På grunn av begrensningene til veksleretteren i denne simuleringen ble det brukt 19 moduler i serie og 12 strenger i parallell, altså motsatt av det som er i hovedsimuleringen.

3.1.4 Virkningsgrader i PV-anlegget

Tapene i PV-anlegget kan deles inn i 3 deler:

- Tap på grunn av skygger/snølag på modulene, samt refleksjon av innstrålt energi fra glasset på modulene (η_{ytre}).
- Tap i solcellemodulene (η_{modul}).
- Tap i veksleretteren (η_{vr}).

Tapene i solcellemodulene kan deles inn i:

- Rene kjemiske tap i form av elektroner som fanges opp i reaksjoner inne i modulen, og derfor ikke utnyttes til å danne strøm i en ytre strømkrets.
- Tap på grunn av temperaturen til cellene, kvaliteten på cellene, samspillet mellom de ulike modulene er og ohmske tap i ledere.

Tapene i disse systemene vil være en del av resultatene fra simuleringen i PVsyst. Det vil derfor i denne oppgaven bli tatt utgangspunkt i verdiene fra simuleringene, og disse verdiene vil sammenlignes med disse referanseverdiene:

Solcellene som brukes i simuleringen er av typen multikrystallinske silisiumsolceller. Disse har ifølge kilde ⁵⁵ en virkningsgrad på 15 – 18 %. Det er lite tap i vekslerettere, og ifølge kilde ³⁵ er virkningsgraden til veksleretterne på 97 – 99 %.

Dersom virkningsgraden til PV-anlegget antas å innebære virkningsgraden til ytre påvirkninger, moduler og vekslerettere, kan den beregnes ved hjelp av formelen:

$$\eta_{\text{PV}} = \eta_{\text{ytre}} \cdot \eta_{\text{modul}} \cdot \eta_{\text{vr}} \quad (20)$$

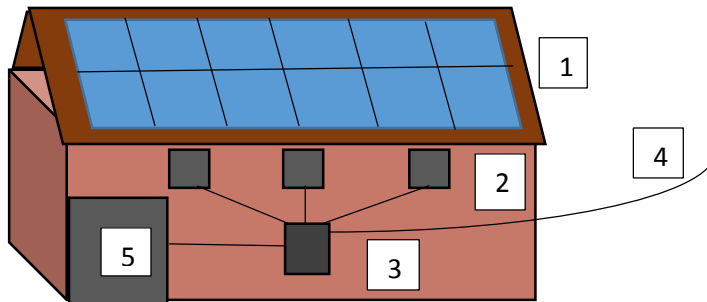
Hvor η_{PV} er virkningsgraden til hele PV-anlegget, η_{ytre} er virkningsgraden til ytre påvirkninger, η_{modul} er virkningsgraden til moduler og ledninger og η_{vr} er virkningsgraden til veksleretterne.

Virkningsgraden til PV-anlegget vil bli beregnet som et gjennomsnitt av verdiene fra PVsyst ved de seks hovedsimuleringene. Et eksempel på en oversikt over tap fra PVsyst er gitt i vedlegg 4.

3.2 Ladestasjon for batterier

Oppsett ladestasjon:

Strøm fra nett og PV-anlegg vil begge bli sendt til en fordelingsboks, hvor strømmen blir ført til ladestasjon eller bygning i en felles ledning. Fordelingsboksen kan også sende strømmen produsert fra PV-anlegget til nettet, om det skulle være overskudd av elektrisitet. En forenklet figur av oppsettet er vist i figur 15.



Figur 15: Viser en oversikt over oppsettet til ladestasjon, nett og PV-anlegg på låven.

Likestrøm fra PV-anlegget (1) sendes til vekselretterne (2), hvor likestrøm blir gjort om til vekselstrøm. Vekselstrøm fra nettet (4) og vekselretterne sendes til fordelingsboksen (3), og sendes videre til ladestasjonen (5), hvor spenning og strøm tilpasses batteriet.

Grunnen til at det er valgt overføring av vekselstrøm fra fordelingsboksen er at det i de aller fleste låver er anlegget allerede bygget for vekselstrøm, og at dette forenkler oppsettet opp mot resten av låven/gården. Dersom det elektriske anlegget i låven hadde vært tilpasset likestrøm ville det lønt seg å bruke et oppsett som var tilpasset likestrøm.⁵⁶

Virkningsgrader:

Det er i denne oppgaven tatt utgangspunkt i at det ikke er noe tap i selve ladestasjonen, men at det kun er tap i omformeren som tilpasser og kontrollerer strøm og spenning ned til selve ladestasjonen. Omformeren har som ble beskrevet i delkapittel 2.2.2 en virkningsgrad på mellom 0,97 og 0,99. Den totale virkningsgraden til ladestasjonen, η_{LS} , er derfor lik virkningsgraden til omformeren, η_o , og er derfor på $\eta_{LS} = 0,98$.

Effektberegninger ladestasjon:

Energibehovet til ladestasjonen fra nett og PV-anlegg vil bli gitt av energibehovet til batteriet til traktoren og virkningsgraden til ladestasjonen. Energibehovet til blir derfor funnet ved hjelp av formelen:

$$E_L = \frac{E_B}{\eta_B \cdot \eta_{LS}} \quad (21)$$

Hvor E_B er den totale energien som trengs fra batteripakkene for 12 timers jordbruksarbeid for ulike jordbruksprosesser, η_B er virkningsgraden til batteriet og η_{LS} er virkningsgraden til ladestasjonen.

Virkningsgraden til batteriet er som forklart i delkapittel 2.2.2. Ut fra energibehovet ved oppladningen av batteriene kan man finne effektbehovet fra ladestasjonen når oppladningen av batteriene kan gjøres over 24 timer ved hjelp av formelen:

$$P_L = \frac{E_L}{24 t} \quad (22)$$

Hvor E_L er energien som trengs for å lade batteriet.

Det er viktig å dimensjonere anlegget slik at man har mulighet til å trekke hele den maksimale effekten fra nettet, da man ikke har noen garanti for at batteriladningen vil foregå når det er sol. Den maksimale effekten som vil trekkes fra ladestasjonen vil være gitt av den mest energikrevende prosessen. Problematikken rundt nettilkoblingen vil beskrives videre i delkapittel 3.4.

3.3 Hydrogenproduksjonsstasjon

Produksjon av hydrogen kan gjøres på mange måter, og i denne oppgaven vil det fokuseres på hydrogenproduksjon gjennom elektrolyse av vann. Oppsettet av stasjonen har mange likhetstrekk med ladestasjonen til batterier, sett bort fra at komponent (5) i figur 15 må byttes ut med en elektrolysør.

Elektrolysøren vil levere hydrogen til enten en tank ved siden av låvebygningen hvis man går for løsningen med gasstanker i traktoren eller direkte til metallhydridtankene hvis denne løsningen velges.

Virkningsgrad:

Virkningsgraden til elektrolysøren, η_{ELyse} , er gitt ved formelen:

$$\eta_{\text{ELyse}} = \frac{1,48V}{V_C} \quad (23)$$

Hvor V_C er spenningen over en elektrolysecelle og 1,48V er spenningen som ville stått over elektrolysecellen dersom den ble brukt som brenselcelle og alt det aktive materialet ble brukt.

Spenningen over hver elektrolysecelle er på mellom 1,6 V og 2,0 V. Dette tilsvarer virkningsgrader på mellom 0,74 og 0,93. Dersom det i tillegg til selve elektrolysøren blir tatt hensyn til kompresjonen av produktgassen i tillegg, får man en virkningsgrad på mellom 0,6 og 0,7.⁴⁵ Virkningsgraden til elektrolysøren settes til å være $\eta_{\text{ELyse}} = 0,64$ i denne oppgaven.

Det vil, som for ladestasjonen til batterier, også for hydrogenproduksjonsstasjonen være nødvendig med en komponent som omformer vekselstrøm fra fordelingsboksen til likestrøm, samt styrer strøm og spenning inn til elektrolysøren. Det vil derfor være tap til omformerer i forbindelse med hydrogenproduksjonsstasjonen. Virkningsgraden til hydrogenproduksjonsstasjonen, η_{HP} , er dermed gitt av formelen:

$$\eta_{\text{HP}} = \eta_{\text{ELyse}} \cdot \eta_O \quad (24)$$

Hvor η_{ELyse} er virkningsgraden til selve elektrolysøren og η_O er virkningsgraden til omformerer.

Effektberegninger:

Behovet for hydrogen er gitt av forbruket til hydrogentraktoren. Hvor mye elektrisitet som trengs per kg produsert hydrogen avhenger av hvilken elektrolysecelletepe som brukes, og hvor mange celler elektrolysøren er bygget opp av. Det er valgt å se på en elektrolysør med en virkningsgrad på 0,64. I følge kilde⁵⁷, vil en elektrolysør med en slik virkningsgrad trenge en energimengde per produsert kg hydrogen på $ER = 60,5$ kWh/kg.

Den elektriske energien som forbrukes per kg produsert hydrogen, ER, er gitt av virkningsgraden til elektrolyseren. Dersom man går ut fra at alt hydrogenet som skal forbrukes i løpet av en dag produseres i løpet av 24 t, kan den elektriske energien som trengs derfor beregnes ut fra formelen:

$$E_{\text{prod, H}_2} = \frac{LB_{\text{H}_2} \cdot ER}{\eta_o} \quad (25)$$

Hvor LB_{H_2} er hydrogenet som forbrukes i løpet av 12 timers arbeid (kg), ER er energien som trengs for å produsere 1 kg hydrogen (kWh/kg) og η_o er virkningsgraden til omformerer.

Den elektriske effekten som trengs ved 24 timers hydrogenproduksjon kan beregnes fra formelen:

$$P_{\text{prod, H}_2} = \frac{E_{\text{prod, H}_2}}{24 t} \quad (26)$$

Hvor $E_{\text{prod, H}_2}$ er energien som trengs for å produsere en dags forbruk av hydrogen [kWh].

Disse utregningene vil bli tatt med i denne oppgaven, men det vil være fokus på at det produseres hydrogen når det produseres strøm fra PV-anlegget. De mest interessante utregningene er derfor å se sammenhengen mellom produsert strøm fra PV-anlegget og forbruk over et år. Dette for å se om man gjennom et år får produsert nok hydrogen til at forbruket dekkes. Dette vil beskrives mer i avsnitt 5.2: Sammenligning av energiforbruk og –produksjon.

3.4 Effekt fra nettet

For ladestasjonen er det viktig at det er mulighet for å trekke den effekten som trengs til opplading av batteripakkene fra nettet, ettersom det ikke er noen garanti for at det er produksjon ved PV-anlegget til akkurat de samme tidene som batteriene må lades.

Det er den jordbruksprosessen som krever mest effekt fra nettet som er dimensjonerende for effekten som må kunne trekkes fra nettet. Det vil være behov for hurtigladere ettersom det er viktig at traktoren alltid har tilgang på et oppladet batteri i perioder hvor den brukes mye. Hurtigladere kommer vanligvis med ytelser på 22 kW, 50 kW og 100 kW.⁵⁸

Kapasiteten på nettet inn til gården er ulik fra gård til gård, men for innføring av hurtigladere er det som regel ikke nok kapasitet på nettet som allerede går inn til gården. Når dette er tilfeller blir det nødvendig å øke nettkapasiteten inn til gården, slik at effektoverføringen til ladestasjonen skal være stor nok.⁵⁸

På grunn av effekten som ladestasjonen må trekkes fra nettet bør spenningen være noe høyere enn det er på normale lavspenningsnettet (0,23 – 0,4 kV), og tilkoblingen bør derfor skje på et mellomspenningsnett (11 – 22 kV).^{58, 59} Påkoblingsmulighetene er derfor avhengig av tre ting: avstand til nærmeste mellomspenningsnett, avstand til nærmeste transformatorstasjon med nok ledig kapasitet og kostnaden gårdseier er villig til å betale for eventuelle anleggsbidrag.⁵⁸

4 Datagrunnlag

I dette kapittelet blir datagrunnlaget for oppgaven gjennomgått. Det gjennomgås datagrunnlaget for dieselforbruk, data for simuleringen av PV-anleggene og forbruksmønsteret til traktorene i de ulike områdene.

4.1 Datagrunnlag for dieselforbruk ved ulike jordbruksprosesser

Det å finne generelle tall for dieselforbruket til en traktor, er en komplisert oppgave. Dette skyldes at drivstofforbruket varierer med bl.a. topografien, jordtypen, fuktighetsgraden i jorda og hvor langt det er mellom gårdens landbruksområder.⁶⁰

I denne oppgaven er tallene for dieselforbruket til traktoren hentet fra undersøkelser utført av Bioforsk Landbruk på oppdrag fra Norges forskningsråd. Rapporten er en del av en livssyklusanalyse for matproduksjonskjeder i Norge, og heter «Inventory of Norwegian grain production», kilde⁶¹. Undersøkelsen har fokus på kornproduksjon, og alle tall som er hentet fra rapporten gjelder derfor for denne typen jordbruk. Rapporten inneholder tall for dieselforbruk ved seks forskjellige gårder i de tre største korndyrkingsområdene i Norge: Langs Oslofjorden, i Mjøsaområdet og langs Trondheimsfjorden, med jordbruksarealer på mellom 28 ha og 240 ha.

Tabellene over dieselforbruket ved de forskjellige gårdene er gitt i vedlegg 2, her er det også gitt videre informasjon om de forskjellige gårdene. Tallene for drivstofforbruk er hentet direkte fra gårdseierne eller ved hjelp av kalkulasjoner gjort av Bioforsk Landbruk. I følge rapporten samsvarer tallene de har funnet godt over ens med lignende forsøk gjort i andre land.

I denne oppgaven blir det brukt gjennomsnittsverdier av tallene i tabellene i vedlegg 2 for dieselforbruket ved de forskjellige jordbruksprosessene. Det er sett bort fra treskingen i denne oppgaven, da dette blir gjort med en skurtresker og ikke traktoren.

4.2 Datagrunnlag for simulering av solenergi: Meteonorm 6.1

Mulige datagrunnlag til solenergisimuleringer er:

- Måledata fra stedet simuleringen blir gjort for.
- Genererte data fra dataprogrammer. Disse bruker enten satellittdata, måledata fra stasjoner eller en kombinasjon av disse to.

Data basert på satellittdata er bedre jo nærmere ekvator målepunktet er, da satellittene som brukes til å måle soldata ofte er geostasjonære.⁶² Geostasjonære satellitter er satellitter som beveger seg i sirkelbaner rundt ekvator. Dette skyldes at satellittene får en spissere vinkel i forhold til målepunktet ved høye breddegrader, og at det da er vanskelig å få klare mål på skydekket.⁶³ Problemene ved måling av skydekket forverres når det er snø på bakken, da satellitten kan forveksle snø med skyer.⁶⁴

Meteonorm bruker data fra både satellitter og målestasjoner i området man skal se på. Det er bare tre norske målestasjonene som gir måledata til Meteonorm, og disse er plassert i Bergen, Bodø og Tromsø. I tillegg til dette er det også 11 stasjoner i Sverige. Meteonorm er ansett som en av de beste kildene til genererte soldata, fordi disse kombinerer data fra både målestasjoner og satellitter.⁵³

Datagrunnlaget for solinnstråling, temperatur og vind til simuleringen av produsert elektrisitet fra PV-anlegget på gårdene er i denne oppgaven basert på genererte data gitt av Meteororm. Det er dette datasettet som PVsyst bruker når de generer værdata for områder hvor man som bruker ikke har tilgang på måledata. Grunnen til at det er valgt å bruke disse dataene er mangel på tilstrekkelig måledata for flere av områdene, og at det å behandle de målte dataene er tidkrevende og krever kvalitetssikring av beregninger som blir gjort og datagrunnlaget man har.

Datagrunnlaget fra Meteororm er gitt i månedsverdier for meteorologiske data basert på måleserier fra de tre nærmeste målestasjonene til plasseringen samt satellittmålinger i området. Måleseriene er gjennomsnittlige verdier fra perioden 1961-1990 og er bakgrunn for generering av timesverdier i PVsyst.⁶⁵

4.3 Datagrunnlag tidsbruk for ulike jordbruksprosesser

For å finne tall for tidsbruken og når på året ulike jordbruksprosesser blir gjort er det valgt å ta kontakt med bønder som driver med jordbruk i de forskjellige områdene. Bakgrunnen for valg av bønder er gitt under, og informasjonen som ble mottatt fra de ulike bøndene er gitt i vedlegg 5.

Troms: Balsfjord

Balsfjord er den kommunen med mest jordbruk i Troms, og her dyrkes det i hovedsak gress. Over 99 % av dyrket mark går til dyrking av gress, men det er også noe dyrking av grønnsaker i dette området.⁶⁶ Det er med utgangspunkt i dette valgt å snakke med en gressdyrkende bonde i dette området. Jordbruksarealet til denne bonden er på 300 dekar.⁶⁷

Nord-Trøndelag: Verdal

Verdal er et område hvor det i hovedsak dyrkes korn og gress, og fordelingen mellom jordbruksarealer brukt til disse plantearealene er ganske like. Det dyrkes også noe grønnsaker her.⁶⁸ Det er med utgangspunkt i dette valgt å snakke med en korndyrkende bonde fra Verdal. Jordbruksarealet til denne bonden er på 1700 dekar.⁶⁹

Rogaland: Sola

I Rogaland er Jæren det området hvor det driftes mest jord, og Sola er en del av Jæren. I Jæren går rundt 50 % av jordbruksarealene til dyrking av gress, 40 % til dyrking av beitemark og de resterende prosentene går til dyrking av grønnsaker, korn og oljevekster.⁷⁰ Det er derfor valgt å snakke med en gressdyrkende bonde. Jordbruksarealet til denne bonden er på 1100 dekar.⁷¹

Akershus: Ås

I Ås dyrkes det i 2014 ca. 85 % korn, men det dyrkes også en del grovfôr, grønnsaker, og frukt og bær i området.⁷² Det er derfor valgt å snakke med en korndyrkende bonde i dette området. Jordbruksarealet til denne bonden er på 2900 dekar.⁷³

Gården i Balsfjord og Sola dyrker gress, og traktoren brukes her til høsting av gress i tillegg til jordbruksprosessene som det er sett på hittil i oppgaven. I følge kilde⁷¹ bruker traktoren rundt 25 liter diesel i timen ved gresshøstingen, og er tatt med i beregningene for disse to gårdene i beregningene forklart i kapittel 5: Helhetlig bilde. Det er valgt å se bort fra denne jordbruksprosessen i de andre utregningene da det mangler sikre kilder på dieselforbruket.

4.4 Datagrunnlag for jordbruksarealer

Datagrunnlaget for jordbruksarealer i Norge er hentet fra Statistisk sentralbyrå. En oversikt over gjennomsnittlige jordbruksarealer og antall jordbruk fordelt på jordbruksarealer totalt for Norge og fordelt på fylkene er gitt i tabellen i vedlegg 6 for 2014. Tallene i tabellen er hentet fra kilde ⁷⁴ og ⁷⁵, og inkluderer ikke jordbruksarealer på under 5 dekar. Gjennomsnittsarealet på jordbrukene i fylkene til områdene det er sett på i denne oppgaven er i Troms (Balsfjord) på 242 daa, I Nord-Trøndelag (Verdal) på 266 daa, i Rogaland (Sola) på 225 daa og i Akershus og Oslo (Ås) på 250 daa. Landsgjennomsnittet er på 230 daa.

5 Helhetlig bilde

I dette avsnittet er teorien og fremgangsmåten for sammenligning av forbruk og produksjon av elektrisitet og hydrogen gjennomgått. Det er sett på to sammenligninger: månedlig og årlig, hvor det for hydrogentraktoren kun blir sett på årlig sammenligning. Mot slutten av dette avsnittet blir det også sett på virkningsgradene til hele systemene, inkludert dieseltraktoren. Fokuset er her på å se på virkningsgraden fra produsert energi/energibærer til energien blir utnyttet.

5.1 Traktorbruk

Basert på tabellene i vedlegg 5, som viser tidsbruken og periodene som traktoren brukes til de ulike jordbruksprosessene, kan forbruket til en viss grad bestemmes. I dette avsnittet vil teori og metode for beregninger av forbruksmønsteret til de elektriske traktorene bli gjennomgått.

Tidsbruk per dekar:

Fordelingen av arbeidstimer for de ulike jordbruksprosessene ved de ulike gårdene er representert tabellene i vedlegg 5. For å finne tidsbruken per dekar, T , for hver jordbruksprosess i hvert av områdene er denne formelen brukt:

$$T = \frac{t}{A} \quad (27)$$

Hvor t er antall timer brukt ved de ulike gårdene per jordbruksprosess og A er arealet på gårdene gitt i antall dekar.

For å finne ut hvor mye energi en traktor forbruker per måned per dekar, ED , brukes merkingen for hvilke måneder de ulike jordbruksprosessene utføres og denne formelen:

$$ED = \sum(T \cdot P_{\text{Bruk}}) \quad (28)$$

Hvor T er tidsbruken per dekar for hver jordbruksprosess, og P_{Bruk} er effekten som trekkes av batteriet eller hydrogenet som forbrukes ved samme jordbruksprosess.

For jordbruksprosesser som utføres over flere måneder, må produktene av tidsbruk og effekten per jordbruksprosess deles på antallet måneder.

Det er disse månedlige verdiene som brukes som bakgrunn for energiforbruket i traktoren.

5.2 Sammenligning av energiforbruk og –produksjon

For å sammenligne den produserte energien fra PV-anlegget og energiforbruket til traktoren er det satt opp to systemer: fra PV-anlegg til batteritraktor og fra PV-anlegg til hydrogentraktor.

Det vil bli utført to forskjellige sammenligninger av energiproduksjon og –forbruk for den batteridrevne traktoren: på månedlig og årlig basis. Begrensningen på hvor liten tidsramme det blir sett på i denne oppgaven kommer av at det ikke er utført noen målinger av data i denne oppgaven. En kortere tidsramme enn på månedsbasis vil føre til stor usikkerhet i resultatene. For tidsperiodene vil det bli sett på en energibalanse, hvor det i løpet av året eller måneden ikke skal forbrukes mer energi enn det som produseres i PV-anlegget. Ettersom produsert energi skal være like stor som forbrukt energi, kan det med dette settes en begrensning for hvor mange dekar som kan driftes fra PV-anlegget. Begrensningen for antall dekar traktoren kan drifte vil bli mindre når det skal være en

månedlig energibalanse enn ved en årlig energibalanse. Dette skyldes at det er den måneden hvor forbruk og produksjon sammenfaller som er den bestemmende for hvor store jordbruksarealer som kan driftes. For hydrogentraktoren vil det bli sett på årlig produksjon av hydrogen ved hydrogenproduksjonsstasjonen opp mot årlig forbruk av hydrogen i traktoren.

Grensesnittet for produksjon og forbruk er satt til å være ved oppladningen av batteriet og påfyllingen av hydrogenet. Dette betyr at produsert energi for den batteridrevne traktoren tilsvarer energien levert fra vekselretterne til PV-anlegget, trukket fra tapene i ladestasjon.

Arealet, A , som kan driftes ved disse systemene kan beregnes ved hjelp av formelen:

$$A = \frac{E_{prod}}{E_{dekar}} \quad (29)$$

Hvor E_{prod} er den tilgjengelige energien til oppladning av batterier eller mengden produsert hydrogen i kg og E_{dekar} er energien eller hydrogenet som forbrukes av traktoren per dekar jordbruksområde.

Verdiene er enten månedlige eller årlige ut fra hvilken av energibalansene det blir sett på. For begge energibalansene og hydrogenbalansen er månedlig energi- eller hydrogenproduksjon og månedlig energi- eller hydrogenforbruk satt opp mot hverandre.

5.3 Sammenligning av de ulike systemene

En viktig del av analysen av systemene som helhet er well – to – wheel (WTW) virkningsgradsanalyser. WTW-virkningsgraden er virkningsgraden til traktorsystemene fra produksjon av elektrisk energi eller drivstoff. For dieseltraktoren betyr dette fra oljen pumpes opp av bakken til effektoverføringen fra hjulene til traktoren til underlag. For de elektriske traktorene betyr dette fra den elektriske energien produseres til effektoverføringen fra hjul til underlag. For PV-anlegget er også ytre påvirkninger på den innstrålingen tatt med i denne beregningen.

Dieseltraktoren:

Dieseltraktoren bruker diesel, som må pumpes opp av bakken, raffineres og prosesseres før den kan brukes i traktoren. WTW-virkningsgraden til dieseltraktoren blir derfor gitt av formelen:

$$\eta_{WTW, DT} = \eta_{WTT, D} \cdot \eta_{totT} \quad (30)$$

Hvor $\eta_{WTT, D}$ er virkningsgraden av dieselproduksjonen fra den pumpes opp til bakken til den er i tanken på traktoren, og η_{totT} er den totale virkningsgraden til dieseltraktoren.

Well – to – tank (WTT) virkningsgraden for diesel er funnet fra kilde ⁷⁶ til å være $\eta_{WTT, diesel} = 0,85$.

PV-anlegg til batteritraktor:

Når all energien som forbrukes av den batteridrevne traktoren kommer fra PV-anlegget vil WTW-virkningsgraden til systemet være gitt av formelen:

$$\eta_{WTW, PV \rightarrow ET} = \eta_{PV} \cdot \eta_{LS} \cdot \eta_{totT} \quad (31)$$

Hvor η_{PV} er virkningsgraden til PV-anlegget, η_{LS} er virkningsgraden til ladestasjonen og η_{totT} er virkningsgraden til den batteridrevne traktoren.

PV-anlegg til hydrogentraktor:

For hydrogentraktoren vil WTW-virkningsgraden være gitt av samme formel, men virkningsgraden til ladestasjonen og den elektriske traktoren er byttet ut med virkningsgraden til hydrogenproduksjonsstasjonen og hydrogentraktoren. Formelen for WTW-virkningsgraden blir dermed:

$$\eta_{\text{WTW, PV} \rightarrow \text{H}} = \eta_{\text{PV}} \cdot \eta_{\text{HP}} \cdot \eta_{\text{totT}} \quad (32)$$

Hvor η_{PV} er virkningsgraden til PV-anlegget, η_{HP} er virkningsgraden til hydrogenproduksjonsanlegget og η_{totT} er virkningsgraden til hydrogentraktoren.

Vannkraftverk – nett – ladestasjon – traktor

For batteritraktoren vil det slik som systemene er satt opp i denne oppgaven være behov for å få tilgang på strøm fra nettet for å alltid ha tilgang på nok energi til batteriene. For denne traktoren vil det derfor være behov for å se på WTW-virkningsgraden for strøm fra nettet til traktorhjulene. Hoveddelen av strømmet som produseres i Norge kommer fra vannkraft, og det vil i denne oppgaven bli tatt utgangspunkt i at den elektriske strømmen produseres i et vannkraftverk. Dette fører til at formelen for WTW-virkningsgraden blir:

$$\eta_{\text{WTW, N} \rightarrow \text{ET}} = \eta_{\text{VK}} \cdot \eta_{\text{KN}} \cdot \eta_{\text{LS}} \cdot \eta_{\text{totT}} \quad (33)$$

Hvor η_{VK} er virkningsgraden til et vannkraftverk, η_{KN} er virkningsgraden til kraftnettet, η_{LS} er virkningsgraden til ladestasjonen og η_{totT} er virkningsgraden til den batteridrevne traktoren.

Virkningsgraden til et vannkraftverk er ifølge kilde ⁷⁷ på over 90 %, og settes derfor i denne oppgaven til å være $\eta_{\text{VK}} = 0,9$. Tapene i kraftnettet er ifølge kilde ⁷⁸ på rundt 7 %, og virkningsgraden til kraftnettet er derfor satt til å være $\eta_{\text{KN}} = 0,93$.

6 Resultater

I dette kapitlet presenteres resultatene som fremkommer av teorien og metodene beskrevet i kapittel 2, 3, og 5. Først presenteres resultatene for virkningsgrader og forbruket til dieseltraktoren, batteritraktoren og hydrogentraktoren. Deretter presenteres resultatene for produksjonen av elektrisk energi fra PV-anlegget, behovet for elektrisk effekt og energi til ladestasjonen og elektrisitetsbehovet og hydrogenproduksjonen til hydrogenproduksjonsstasjonen. Mot slutten av kapitlet presenteres resultatene for systemene til de to elektriske traktorene som helhet, samt WTW- virkningsgrader for alle traktorsystemene det er sett på i denne oppgaven.

6.1 Traktorene

6.1.1 Dieseltraktoren

Virkningsgraden til dieseltraktoren er funnet ved hjelp av formel 8 ved bruk av kraftuttak, og formel 3 når kraftuttaket ikke er i bruk, og med virkningsgradene gitt i delkapittel 2.1.2: Komponentene i dieseltraktoren. Verdiene for virkningsgradene ble $\eta_{\text{totT}} = 0,27$ med kraftuttak og $\eta_{\text{totT}} = 0,16$ uten kraftuttak.

Tabell 6 viser verdiene for dieselforbruket, tilsvarende innfyrt effekt og den totale nyttbare effekten fra traktoren ved hjul og kraftuttak for ulike jordbruksprosesser.

Tabell 6: Viser effektberegningene gjort for dieseltraktoren ved ulike jordbruksprosesser, hvor utgangspunktet er dieselforbruket i timen hentet fra kilde ⁶¹.

Prosess	Dieselforbruk [L/h]	Bruker kraftuttak	Innfyrt effekt [kW]	Total effekt ut [kW]
Kjemisk brakking	2,1	x	21	5,7
Pløying	26		260	41
Slodding	8,0		81	13
Steinplukking	2,3	x	23	6,2
Harving	6,7		68	11
Kalking	4,0	x	40	11
Såing og gjødsling	7,9	x	80	21
Delgjødsling	1,9	x	19	5,1
Sprøyting	13	x	130	35
Tromling	2,5		25	4,0
Formel:	Fra kilde ⁶¹	Fra kilde ⁷⁹	1	2 og 4

Fra tabell 6 kan det sees at dieselforbruket ved ulike jordbruksprosesser varierer mye, og at den innfyrt effekten og effekten ut av traktoren varierer tilsvarende.

6.1.2 Batteritraktoren

Virkningsgraden til batteritraktoren er funnet ved hjelp av formel 9 ved bruk av kraftuttak, og formel 10 når kraftuttaket ikke er i bruk, og med virkningsgradene gitt i delkapittel 2.2.2: Komponentene i batteritraktoren. Verdiene for virkningsgradene til den batteridrevne traktoren er funnet til å være $\eta_{\text{tot}} = 0,73$ med kraftuttak og $\eta_{\text{tot}} = 0,45$ uten kraftuttak.

Tabell 7 viser effektbehovet ved hjul og kraftuttak gitt av beregningene gjort for dieseltraktoren og det tilhørende effektbehovet fra batteripakkene til batteritraktoren.

Tabell 7: Viser effekten som levers fra hjul og til kraftuttak, samt effektbehovet fra batteripakken ved ulike jordbruksprosesser.

Prosess	Effekt til hjul [kW]	Effekt til kraftuttak [kW]	Effektbehov batteri [kW]
Kjemisk brakking	1,0	4,7	6,7
Pløying	41	0,0	78
Slodding	13	0,0	24
Steinplukking	1,1	5,1	7,3
Harving	11	0,0	20
Kalking	1,9	8,9	13
Såing og gjødsling	3,8	18	25
Delgjødsling	0,9	4,2	6,0
Sprøyting	6,1	28	41
Tromling	4,0	0,0	7,6
Formel:	7	5	11

Tabell 7 viser at den største effekten som kreves fra batteriet er for pløyeprosessen, og er på $P_B = 78$ kW. Det er denne effekten som er dimensjonerende for batteriene. Ved hjelp av denne verdien og 12 timers bruk av traktoren er den totale elektriske energien som trengs fra batteripakkene gitt av formel 12 på $E_B = 930$ kWh. Utrechnet fra formel 13 gir dette 5,8 batteripakker på 170 kWh (160 kWh nyttbar energi), og 12 batteripakker på 85 kWh (80 kWh nyttbar energi). Det er altså behov for seks 170 kWh batteripakker eller 12 85 kWh batteripakker for 12 timers arbeid ved pløying.

Tilsvarende beregninger for de resterende jordbruksprosessene gir resultatene gitt i tabell 8.

Tabell 8: Viser energibehovet fra batterier og antall batteripakker for 12 arbeidstimer for de ulike jordbruksprosessene.

Prosess	Effektbehov batteri [kW]	Energibehov (12 t) batteri [kWh]	Ant. Batteripakker 170 kWh	Ant. Batteripakker 85 kWh
Kjemisk brakking	6,7	80	0,5	1,0
Pløying	78	930	5,8	12
Slodding	24	290	1,8	3,7
Steinplukking	7,3	88	0,5	1,1
Harving	20	240	1,5	3,1
Kalking	13	150	1,0	1,9
Såing og gjødsling	25	300	1,9	3,8
Delgjødsling	6,0	72	0,5	0,9
Sprøyting	41	490	3,0	6,1
Tromling	7,6	91	0,6	1,1
Formel:	11	12	13	13

Behovet for 170 kWh batteripakker varierer fra 0,5 for delgjødslingen til 5,8 for pløyningen, og at behovet for 85 kWh batteripakker varierer fra 0,9 til 12 for de samme prosessene. Batteribehovet varierer altså mye for de ulike prosessene.

Nav-traktoren:

Virkningsgraden til Nav-traktoren er beregnet ved hjelp av formel 9 til å være 0,77 ved bruk av kraftuttak og formel 10 til å være 0,60 uten kraftuttaket. Effektbehovet til batteriet ved bruk av navtraktoren ved pløyningen blir ved hjelp av formel 11 beregnet til å være på 58 kW. Dette gir ved bruk av formel 13 ved 12 timers traktorbruk, et behov for 4,4 170 kWh batteripakker og 8,8 85 kWh batteripakker.

6.1.3 Hydrogentraktoren

Virkningsgraden til brenselcellen er funnet ved hjelp av formel 14 og celledspenningen gitt i delkapittel 2.3.2 til å være $\eta_{FC} = 0,42$. Dette gir ved hjelp av formel 9 og 10 en total virkningsgrad på henholdsvis $\eta_{totT} = 0,35$ ved bruk av kraftuttaket og $\eta_{totT} = 0,22$ når kraftuttaket ikke brukes.

Effektbehovet fra brenselcellen vil være likt effektbehovet fra batteriet i den batteritraktoren. Ved hjelp av dette effektbehovet er det funnet et forbruk av hydrogen i brenselcellen og lagringsbehovet av hydrogen i traktoren ved 12 timer kjøring. Dette er satt opp i tabell 9 under.

Tabell 9: Viser forbruksraten av hydrogen i hydrogentraktoren og lagringsbehovet til traktoren ved 12 timers kjøring.

Prosess	Effektbehov FC [kW]	Forbruk hydrogen [kg/t]	Lagringsbehov hydrogen [kg]
Kjemisk brakking	6,7	0,9	11
Pløying	78	11	130
Slodding	24	3,4	41
Steinplukking	7,3	1,0	12
Harving	20	2,8	34
Kalking	13	1,8	21
Såing og gjødsling	25	3,5	42
Delgjødsling	6,0	0,8	10
Sprøyting	41	5,6	68
Tromling	7,6	1,0	13
Formel:	11	15	16

Ved bruk av den foreslåtte 200 liters tanken, blir lagringskapasiteten og den totale massen til de ulike lagringstankene beskrevet i delkapittel 2.3.2 som i tabell 10.

Tabell 10: Viser den totale lagringskapasiteten i kg og massen til de ulike 200 liters hydrogentankløsninger.

	Lagringskapasitet [kg]	Masse tank [kg]
Komprimert gass	5,3	101
Metallhydrid (LT)	5,8	500
Metallhydrid (HT)	8,1	470
Formel:	17	18

Antallet påfyllinger ved 12 timers kjøring av traktoren ved de ulike hydrogentankløsningene blir som i tabell 11.

Tabell 11: Viser antallet påfyllinger av tanken ved en 12 timers økt ved bruk av de ulike 200 liters tank-systemene. LT – lavt trykk, HT – høyt trykk.

Prosess	Totalt lagringsbehov [kg]	Antall tanker: Komprimert gass	Antall tanker: Metallhydrid (LT)	Antall tanker: Metallhydrid (HT)
Kjemisk brakking	11	2,1	1,9	1,4
Pløying	130	25	22	16
Slodding	41	7,7	7,0	5,0
Steinplukking	12	2,3	2,0	1,5
Harving	34	6,5	5,8	4,2
Kalking	21	4,0	3,6	2,6
Såing og gjødsling	42	7,9	7,2	5,2
Delgjødsling	9,9	1,9	1,7	1,2
Sprøyting	68	13	12	8,3
Tromling	13	2,4	2,2	1,6
Formel:	16	19	19	19

6.2 Solenergi, ladestasjon og hydrogenstasjon

6.2.1 Solenergi

Virkningsgraden til PV-anlegget er beregnet ved hjelp av formel 20, og som forklart i avsnitt 3.1.4: *Virkningsgrader i PV-anlegget*. Dette gir gjennomsnittlige virkningsgrader for ytre påvirkninger, moduler, inverter og hele anlegget som vist i tabell 18.

Tabell 12: Viser gjennomsnittlige virkningsgrader i ulike deler av PV-anlegget, samt den totale gjennomsnittlige virkningsgraden til PV-anlegget.

Komponent	Ytre påvirkning	Moduler	Vekselrettere	Totalt
Virkningsgrad	0,89	0,10	0,96	0,09
Formel:	---	---	---	20

I tabell 13 er det vist en månedlig og årlig sammenligning av produsert energi fra de seks hovedsimuleringene gjort i denne oppgaven.

Tabell 13: Viser simulert månedlig og årlig produsert elektrisk energi fra PV-anleggene i hovedsimuleringene. Alle tall er i MWh.

Plass	Balsfjord, sør	Balsfjord, østvest	Verdal, sør	Verdal, østvest	Sola, sør	Sola, østvest	Ås, sør	Ås, østvest
Januar	0,00	0,00	0,24	0,09	0,19	0,14	0,25	0,16
Februar	0,09	0,03	0,82	0,64	0,49	0,52	0,62	0,65
Mars	1,05	1,26	3,52	4,25	2,45	3,47	2,79	3,78
April	5,00	7,66	7,39	11,39	6,03	9,64	6,38	10,12
Mai	6,71	11,75	8,62	15,29	7,72	14,17	8,48	15,05
Juni	6,70	12,91	8,16	15,16	8,15	15,24	8,21	15,41
Juli	6,01	10,98	7,95	14,60	7,09	13,11	7,96	14,67
August	5,21	8,94	6,76	11,29	6,17	10,64	6,87	11,72
September	2,97	4,05	4,91	6,85	3,84	6,10	5,22	7,54
Oktober	1,72	1,62	3,05	3,08	3,09	3,82	3,00	3,60
November	0,00	0,00	1,09	0,73	1,37	1,32	1,17	1,11
Desember	0,00	0,00	0,25	0,07	0,27	0,17	0,33	0,20
Årsproduksjon:	35,46	59,20	52,77	83,44	46,86	78,34	51,28	84,01

I tabell 14 er det vist en månedlig og årlig sammenligning av produsert energi fra de fem spesialtilfellene forklart i avsnitt 3.1.3: Simulering av spesialtilfeller i PVsystem. Tilfelle 0 er hovedsimuleringen før sørvendte moduler i Ås, og de andre er nummerert på samme måte som i avsnitt 3.1.3.

Tabell 14: Viser simulert månedlig og årlig produsert elektrisk energi fra PV-anleggene i spesialtilfellene. Alle tall er i MWh, og simuleringene er gjort med sørvendte låver i Ås.

Spesialtilfelle nr.	0	1	2	3	4	5
Måned						
Januar	0,25	0,24	0,15	0,30	0,18	0,23
Februar	0,62	0,61	0,50	0,78	0,50	0,59
Mars	2,79	2,75	2,66	3,72	2,60	2,71
April	6,38	6,31	6,15	8,87	5,97	6,23
Mai	8,48	8,41	8,21	12,06	7,90	8,28
Juni	8,21	8,14	7,92	11,83	7,65	8,02
Juli	7,96	7,89	7,69	11,41	7,40	7,77
August	6,87	6,80	6,64	9,69	6,43	6,71
September	5,22	5,16	5,05	7,09	4,89	5,10
Oktober	3,00	2,96	2,57	3,96	2,81	2,93
November	1,17	1,16	0,88	1,49	1,07	1,13
Desember	0,33	0,33	0,17	0,40	0,27	0,31
Årsproduksjon:	51,28	50,76	48,59	71,60	47,66	50,00

6.2.2 Ladestasjon for batterier

Virkningsgraden blir som forklart i delkapittel 3.2 lik virkningsgraden til omformerer, og er dermed på $\eta_{LS} = 0,98$.

Tabell 15 viser energibehovet ved oppladning av batteriene for hver jordbruksprosess når traktoren skal brukes i 12 timer per dag. Tabellen viser også det tilhørende effektbehovet fra ladestasjonen ved 24 t konstant oppladning av batteriene.

Tabell 15: Viser traktorens energibehov fra batteriene ved 12 timers bruk av traktoren, det tilsvarende energibehovet fra ladestasjonen og effektbehovet når oppladningen skal skje over 24 timer.

Prosess	Energibehov batteri 12 timer [kWh]	Energibehov opplading [kWh]	Effektbehov lader 24 timer [kW]
Kjemisk brakking	80	95	4,0
Pløying	930	1100	46
Slodding	290	350	15
Steinplukking	88	100	4,3
Harving	240	290	12
Kalking	150	180	7,5
Såing og gjødsling	300	360	15
Delgjødsling	72	85	3,6
Sprøyting	490	580	24
Tromling	91	110	4,5
Formel:	12	21	22

6.2.3 Hydrogenproduksjonsstasjon

Virkningsgraden til hydrogenproduksjonsstasjonen er funnet ved hjelp av formel 24 til å være lik $\eta_{HP} = 0,63$.

Dersom produksjonen av hydrogen skal gjøres samme dag som forbruket i traktoren, får man ved bruk av elektrolysøren, som beskrevet i delkapittel 3.3 får man et elektrisk energibehov og effektbehov som vist i tabell 16.

Tabell 16: Viser lagringsbehovet i traktoren ved 12 timers bruk, tilsvarende elektriske energi til hydrogenproduksjonen og innfyrt effekt til hydrogenstasjon når produksjonen skal skje i løpet av 24 t.

Prosess	Totalt lagringsbehov [kg/dag]	Elektrisk energi [kWh/dag]	Effekt 24 t produksjonstid [kW]
Kjemisk brakking	11	690	29
Pløying	130	8000	330
Slodding	41	2500	100
Steinplukking	12	750	31
Harving	34	2100	87
Kalking	21	1300	54
Såing og gjødsling	42	2600	100
Delgjødsling	9,9	620	26
Sprøyting	68	4200	170
Tromling	13	780	33
Formel:	16	25	26

6.3 Helhetlig bilde

6.3.1 Balsfjord

Traktorbruken i Balsfjord fører til en oversikt over tidsforbruket per dekar per år fordelt på jordbruksprosessene som vist i tabell 17.

Tabell 17: Viser årlig timesforbruk, årlig tidsforbruk per dekar og perioden for jordbruksprosessene i Balsfjord.

Prosess	Ant timer	Tidsforbruk [t/daa]	Måned
Pløying	15	0,050	Juni
Steinplukking	6,0	0,020	Juni
Harving	2,0	0,0067	Juni
Såing og gjødsling	160	0,54	Juni/August
Tromling	1,0	0,0033	Juni
Gresshøsting	150	0,50	Juli
Formel:	---	27	---
Totalt:	340	1,1	

Batteritraktoren:

Tidsforbruket og henvisningene til måneder i tabell 17 gir et månedlig forbruk av energi fra ladestasjonen som vist i tabell 18.

Tabell 18: Viser månedlig forbruk av elektrisk energi fra ladestasjonen for den batteridrevne traktoren i Balsfjord.

Måned	Månedlig forbruk [kWh/daa]
Januar	0,0
Februar	0,0
Mars	0,0
April	0,0
Mai	0,0
Juni	13
Juli	44
August	7,8
September	0,0
Oktober	0,0
November	0,0
Desember	0,0
Formel:	28
Totalt:	65

Årlig energibalanse:

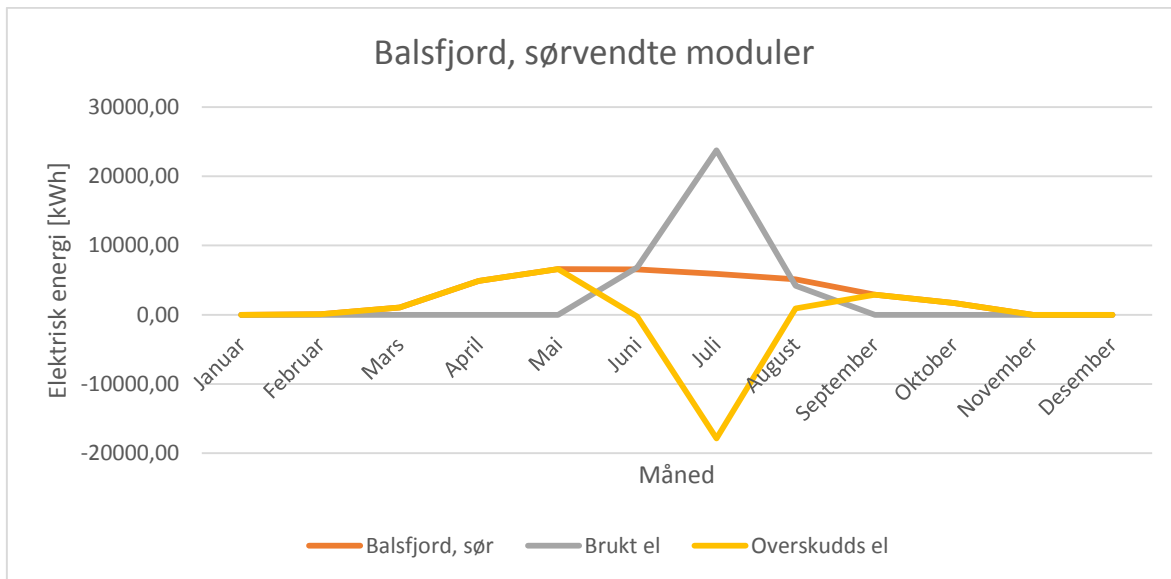
Basert på den produserte elektriske energien tilgjengelig ved ladestasjonen fra PV-anlegget, gitt i tabell 13, er arealet som kan driftes ved en årlig energibalanse for batteritraktoren som gitt i tabell 19.

Tabell 19: Viser årlig tilgjengelig elektrisk energi ved ladestasjonen, og arealene som kan driftes ved en årlig energibalanse i Balsfjord.

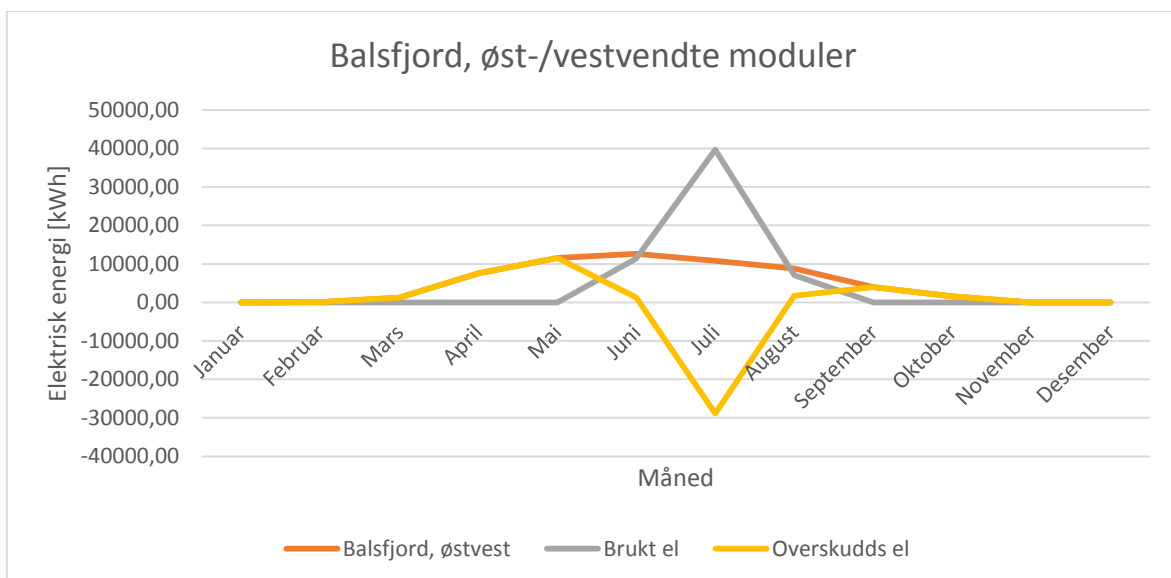
Retning på moduler:	Total produksjon [MWh/år]	Areal [daa]
Sørvendt	35	540
Øst-/vestvendt	58	900
Formel:	---	29

Den totale produksjonen av elektrisitet er beregnet som forklart i delkapittel 5.2: Sammenligning av energiforbruk og –produksjon.

Jordbruksarealene gitt i tabell 19 gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 16 for sørvendte moduler og 17 for øst-/vestvendte moduler.



Figur 16: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Balsfjord.

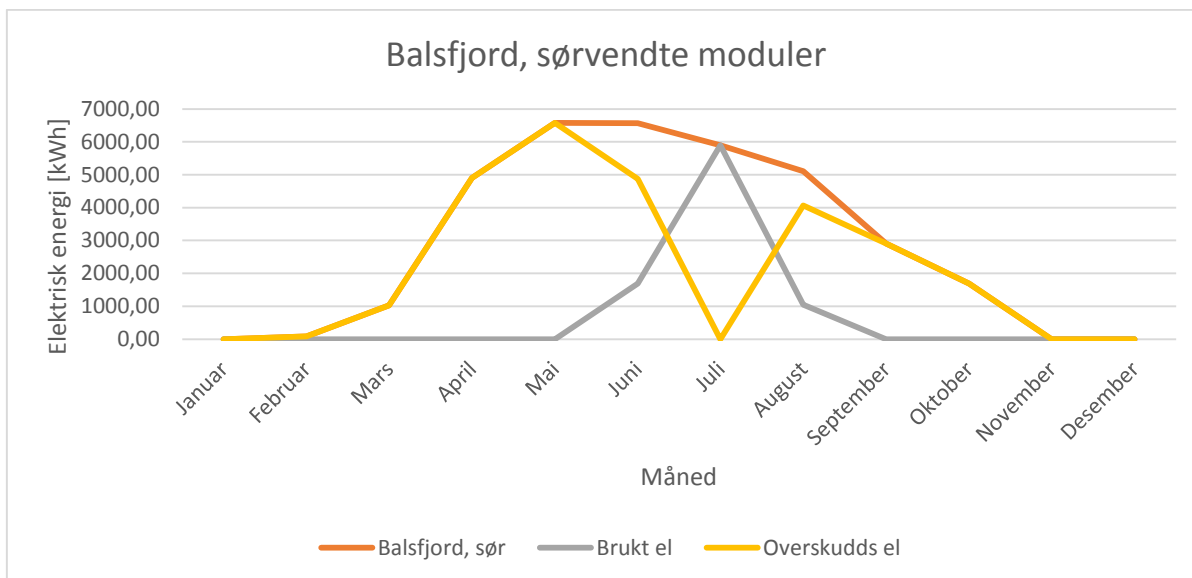


Figur 17: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Balsfjord.

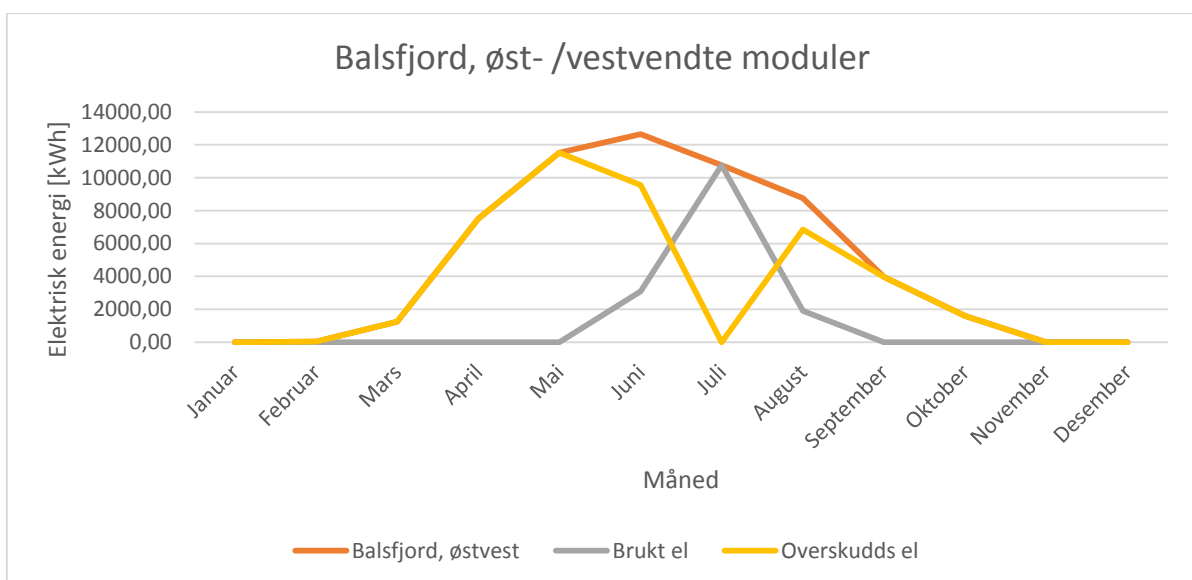
Månedlig energibalanse:

En månedlig utregning av formel 29 gir at traktoren kan drifte 130 daa jorder med energien fra PV-anlegget med sørvendte moduler i Balsfjord og 240 daa jorder med østvestvendte moduler i Balsfjord. Når jorder på disse størrelsene driftes ender det med et overskudd av elektrisk energi på 26 MWh med de sørvendte modulene, og på 42 MWh med de øst-/vestvendte modulene.

Dette gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 18 for sørvendte moduler og 19 for øst-/vestvendte moduler.



Figur 18: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Balsfjord.



Figur 19: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Balsfjord.

Hydrogentraktoren:

Tallene og henvisningene til måneder i tabell 17 gir et månedlig forbruk av hydrogen i traktoren som vist i tabell 20.

Tabell 20: Viser månedlig forbruk av hydrogen fra hydrogentraktoren i Balsfjord.

Måned	Månedlig forbruk [kg/daa]
Januar	0,0
Februar	0,0
Mars	0,0
April	0,0
Mai	0,0
Juni	1,5
Juli	5,3
August	0,9
September	0,0
Oktober	0,0
November	0,0
Desember	0,0
Formel:	28
Totalt:	7,7

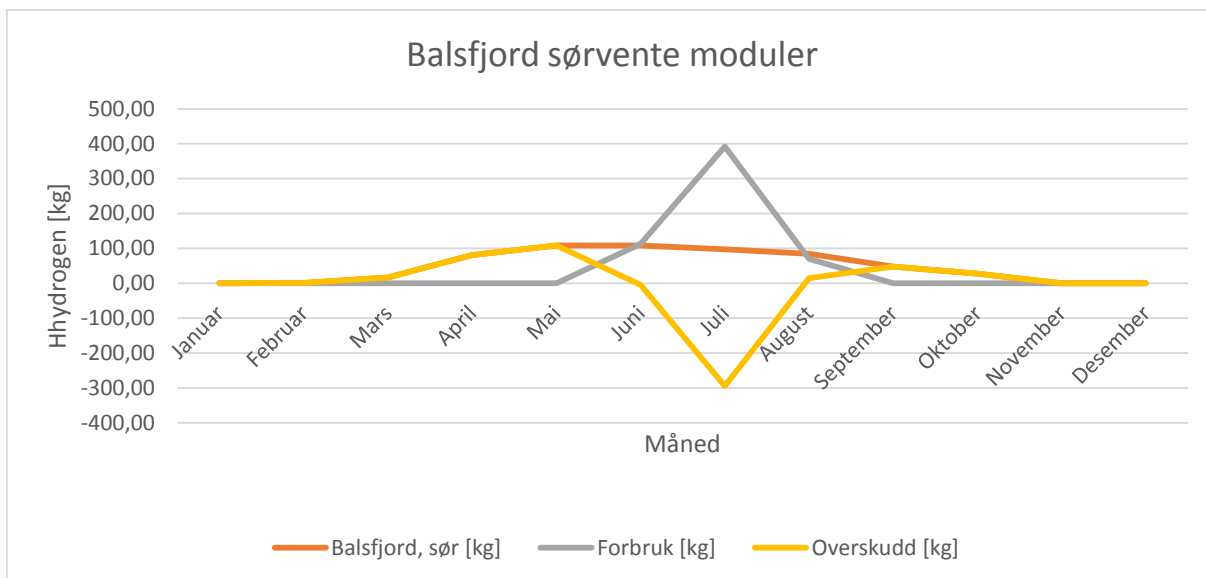
Basert på den produserte elektriske energien tilgjengelig ved elektrolysøren fra PV-anlegget gir dette den årlige produksjonen av hydrogen. Hydrogenet som kan produseres i løpet av et år gir igjen antallet dekar som kan driftes ved en årlig hydrogenbalanse. Dette er vist i tabell 21.

Tabell 21: Viser årlige tall for tilgjengelig elektrisk energi til hydrogenproduksjon, produsert mengde hydrogen, og arealet som kan driftes ved denne hydrogenproduksjonen.

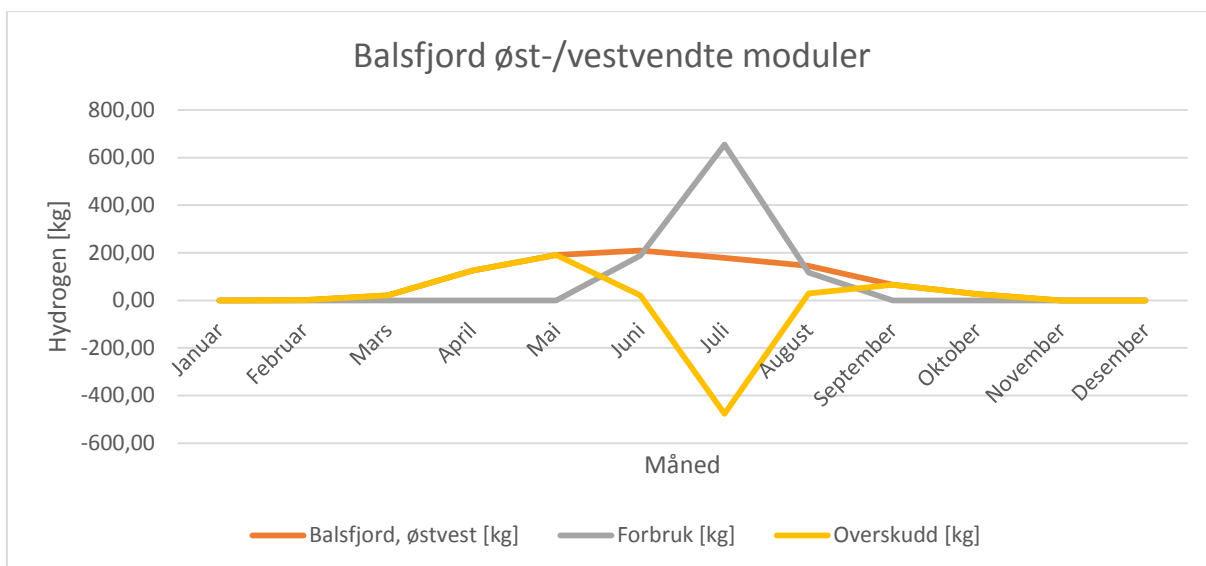
Retning på moduler:	Produsert elektrisitet [MWh/år]	Produsert hydrogen [kg/år]	Areal [daa]
Sørvendt	25	570	74
Øst-/vestvendt	58	960	120
Formel:	---	---	29

Den årlige produksjonen av elektrisitet og hydrogen er beregnet som beskrevet i delkapittel 5.2: Sammenligning av energiforbruk og –produksjon.

Dette gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 20 for sørvendte moduler og 21 for øst-/vestvendte moduler.



Figur 20: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Balsfjord.



Figur 21: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Balsfjord.

6.3.2 Verdal

Traktorbruken i Verdal fører til en oversikt over tidsforbruket per dekar per år fordelt på jordbruksprosessene som vist i tabell 22.

Tabell 22: Viser årlig timesforbruk, årlig tidsforbruk per dekar og perioden for jordbruksprosessene i Verdal.

Prosess	Ant timer	Tidsforbruk [t/daa]	Måned
Pløying	200	0,12	April/mai/oktober/november
Slodding	20	0,012	April/mai
Steinplukking	20	0,012	Mai
Harving	100	0,060	April/mai
Såing og gjødsling	100	0,060	April/mai
Delgjødsling	20	0,012	Juni
Sprøyting	100	0,060	Juni/juli/august/september
Tromling	25	0,015	April/mai
Formel:	---	27	---
Totalt:	590	0,34	

Batteritraktoren:

Tidsforbruket og henvisningene til måneder i tabell 22 gir et månedlig forbruk av energi fra ladestasjonen som vist i tabell 23.

Tabell 23: Viser månedlig forbruk av elektrisk energi fra ladestasjonen for den batteridrevne traktoren i Verdal.

Måned	Månedlig forbruk [kWh/daa]
Januar	0,0
Februar	0,0
Mars	0,0
April	4,4
Mai	4,5
Juni	0,78
Juli	0,69
August	0,69
September	0,69
Oktober	2,7
November	2,7
Desember	0,0
Formel:	28
Totalt:	17

Årlig energibalanse:

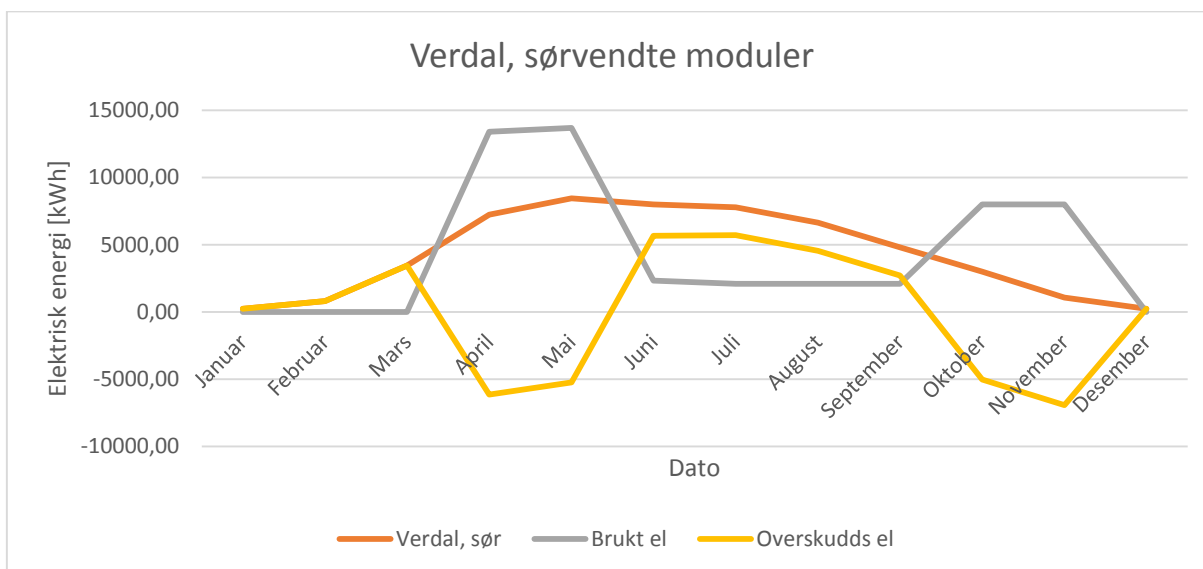
Basert på den produserte elektriske energien tilgjengelig ved ladestasjonen fra PV-anlegget, gitt i tabell 13, er arealet som kan driftes ved en årlig energibalanse for batteritraktoren som gitt i tabell 24.

Tabell 24: Viser årlig tilgjengelig elektrisk energi ved ladestasjonen, og arealene som kan driftes ved en årlig energibalanse i Verdal.

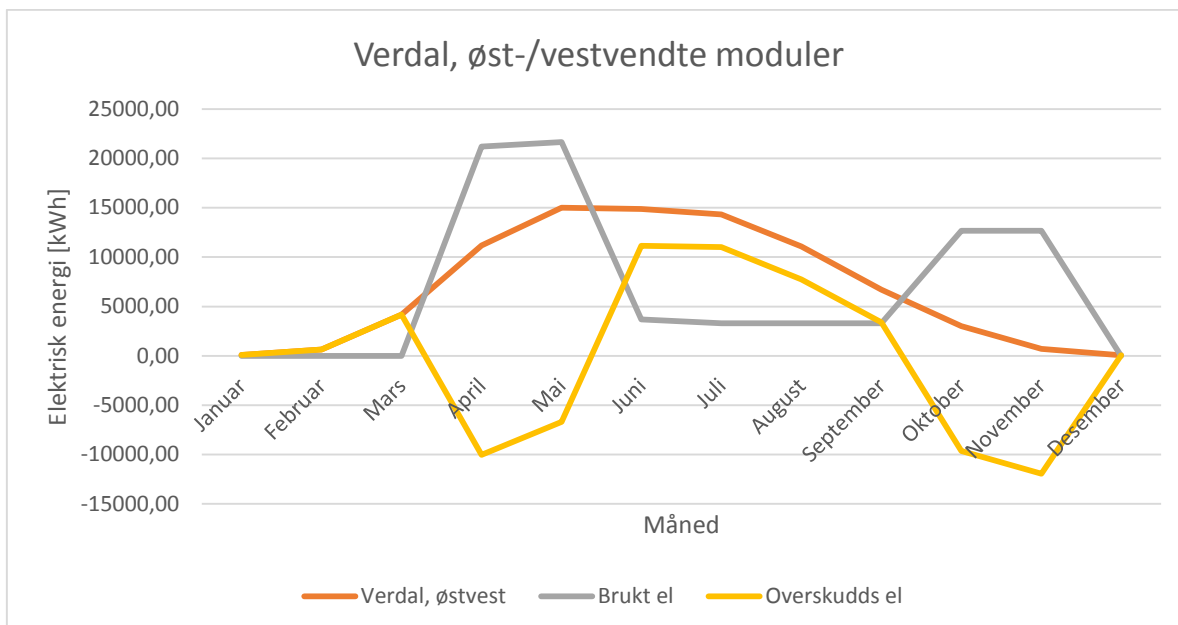
Retning på moduler:	Total produksjon [MWh/år]	Areal [daa]
Sørvendt	52	3000
Øst-/vestvendt	82	4800
Formel:	---	29

Den årlige produksjonen av elektrisitet er beregnet som forklart i delkapittel 5.2: Sammenligning av energiforbruk og –produksjon.

Jordbruksarealene gitt i tabell 24 gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 22 for sørvendte moduler og 23 for øst-/vestvendte moduler.



Figur 22: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Verdal.

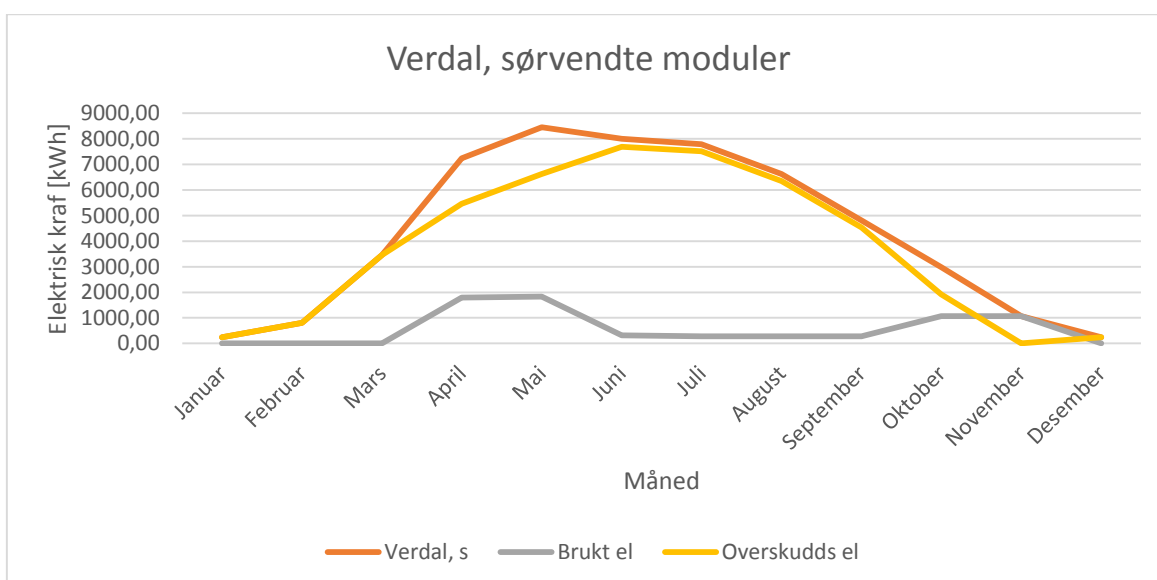


Figur 23: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Verdal.

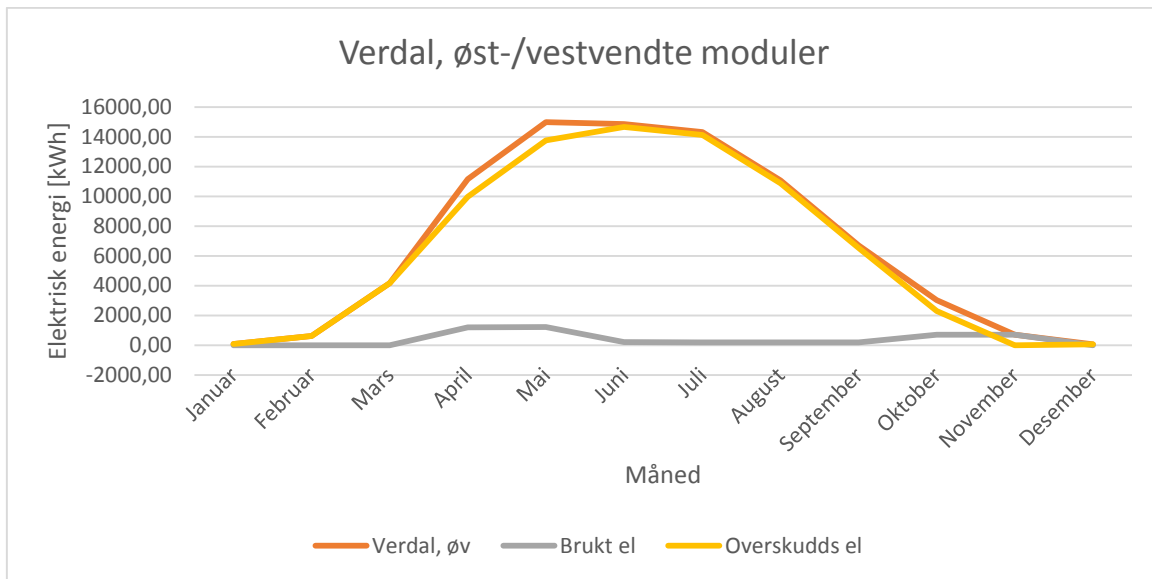
Månedlig energibalanse:

En månedlig utregning av formel 29 gir at traktoren kan drifte 400 dekar jorder med energien fra PV-anlegget med sørvendte moduler i Verdal og 270 dekar jorder med østvestvendte moduler i Verdal. Når jorder på disse størrelsene driftes ender det med et overskudd av elektrisk energi på 45 MWh med de sørvendte modulene, og på 77 MWh med de øst-/vestvendte modulene.

Dette gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 24 for sørvendte moduler og 25 for øst-/vestvendte moduler.



Figur 24: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Verdal.



Figur 25: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Verdal.

Hydrogentraktoren:

Tallene og henvisningene til måneder i tabell 22 gir et månedlig forbruk av hydrogen i traktoren som vist i tabell 25.

Tabell 25: Viser månedlig forbruk av hydrogen fra hydrogentraktoren i Verdal.

Måned	Månedlig forbruk [kg/daa]
Januar	0,0
Februar	0,0
Mars	0,0
April	0,53
Mai	0,54
Juni	0,093
Juli	0,083
August	0,083
September	0,083
Oktober	0,32
November	0,32
Desember	0,0
Formel:	28
Totalt:	2,1

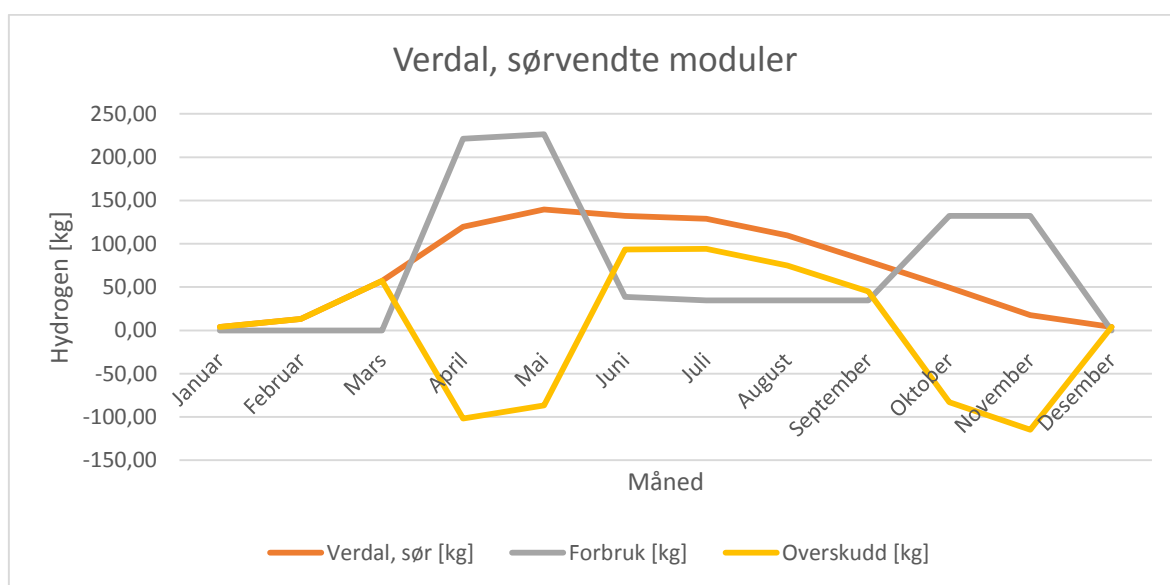
Basert på den produserte elektriske energien tilgjengelig ved elektrolyseren fra PV-anlegget gir dette den årlige produksjonen av hydrogen. Hydrogenet som kan produseres i løpet av et år gir igjen antallet dekar som kan driftes ved en årlig hydrogenbalanse. Dette er vist i tabell 26.

Tabell 26: Viser årlige tall for tilgjengelig elektrisk energi til hydrogenproduksjon, produsert mengde hydrogen, og arealet som kan driftes ved denne hydrogenproduksjonen.

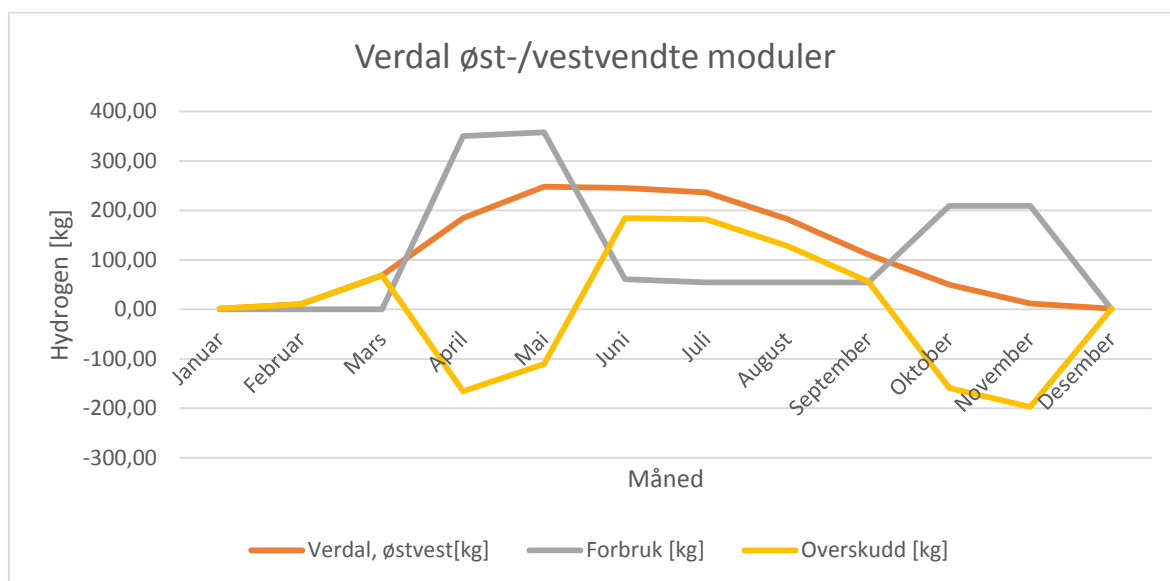
Retning på moduler:	Produsert elektrisitet [MWh/år]	Produsert hydrogen [kg/år]	Areal [daa]
Sørvendte	52	850	420
Øst- /vestvendte	82	1400	660
Formel:	---	---	29

Den årlige produserte elektrisiteten og hydrogenet er beregnet som forklart i delkapittel 5.2: Sammenligning av energiforbruk og –produksjon.

Dette gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 26 for sørvendte moduler og 27 for øst-/vestvendte moduler.



Figur 26: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Verdal.



Figur 27: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Verdal.

6.3.3 Sola

Traktorbruken på Sola fører til en oversikt over tidsforbruket per dekar per år fordelt på jordbruksprosessene som vist i tabell 27.

Tabell 27: Viser årlig timesforbruk, tidsforbruk per dekar og periode for jordbruksprosessene på Sola.

Prosess	Ant timer	Tidsforbruk [t/daa]	Måned
Kjemisk brakking	4,0	0,0036	Oktober
Pløying	40	0,036	April
Slodding	15	0,014	April
Steinplukking	20	0,018	April
Harving	5,0	0,0045	April
Kalking	5,0	0,0045	Februar
Såing og gjødsling	300	0,27	Mars/april
Delgjødsling	500	0,45	Juni/juli/august
Sprøyting	10	0,0091	April/mai
Tromling	7,0	0,0064	April/mai
Høsting av gress	1000	0,91	Mai/juni/juli/august/september/oktober
Formel:	---	27	---
Totalt:	1900	1,7	

Batteritraktoren:

Tidsforbruket og henvisningene til måneder i tabell 27 gir et månedlig forbruk av energi fra ladestasjonen som vist i tabell 28.

Tabell 28: Viser månedlig forbruk av elektrisk energi fra ladestasjonen for den batteridrevne traktoren på Sola.

Måned	Månedlig forbruk [kWh/daa]
Januar	0,0
Februar	0,07
Mars	2,5
April	5,1
Mai	14
Juni	14
Juli	14
August	14
September	13
Oktober	13
November	0,0
Desember	0,0
Formel:	28
Totalt:	92

Årlig energibalanse:

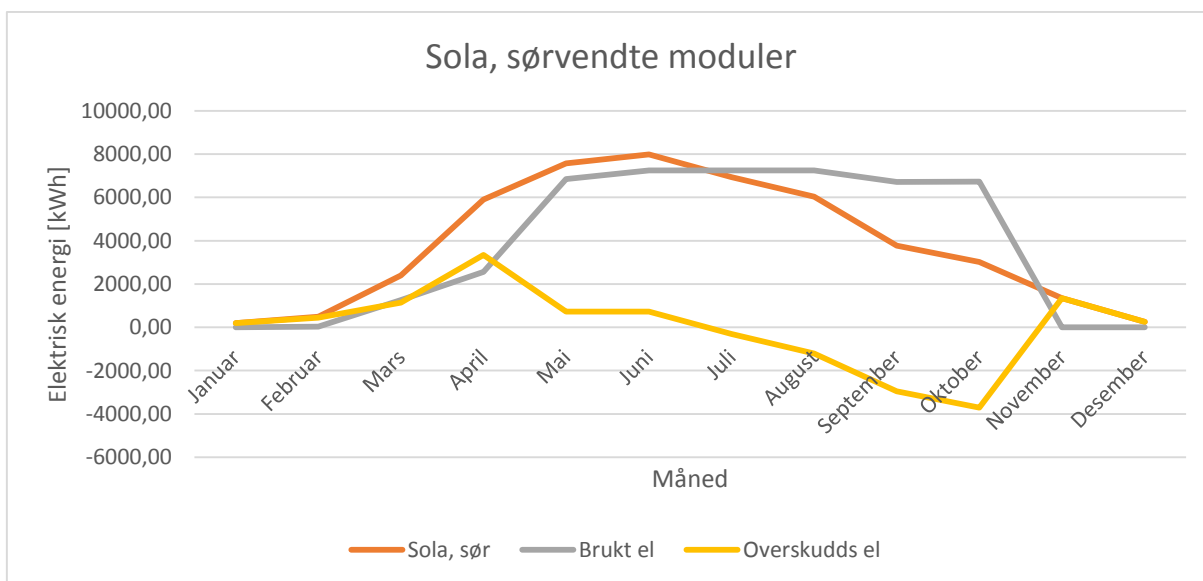
Basert på den produserte elektriske energien tilgjengelig ved ladestasjonen fra PV-anlegget, gitt i tabell 13, er arealet som kan driftes ved en årlig energibalanse for batteritraktoren som gitt i tabell 29.

Tabell 29: Viser årlig elektrisk energi ved ladestasjonen og arealene som kan driftes ved årlig energibalanse på Sola.

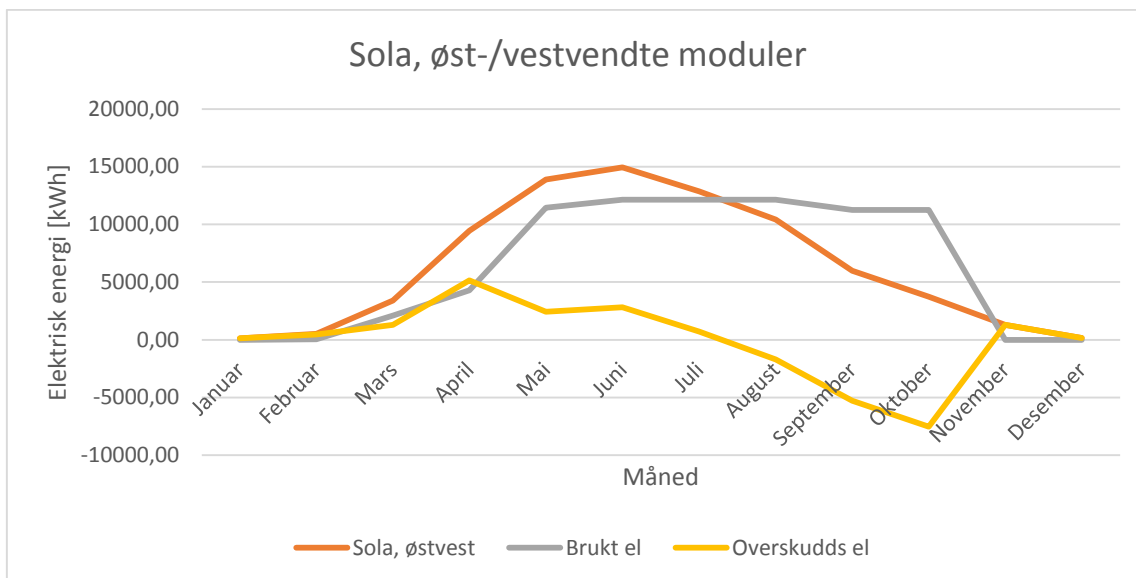
Retning på moduler:	Total produksjon [MWh/år]	Areal [daa]
Sørvendt	46	500
Øst-/vestvendt	77	840
Formel:	---	29

Den totale produksjonen av elektrisitet er beregnet som forklart i delkapittel 5.2: Sammenligning av energiforbruk og –produksjon.

Jordbruksarealene gitt i tabell 29 gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 28 med sørvendte moduler og 29 med øst-/vestvendte moduler.



Figur 28: Viser månedlig sammenligning av forbruk og produksjon av elektrisk energi ved den årlige energibalansen på Sola.

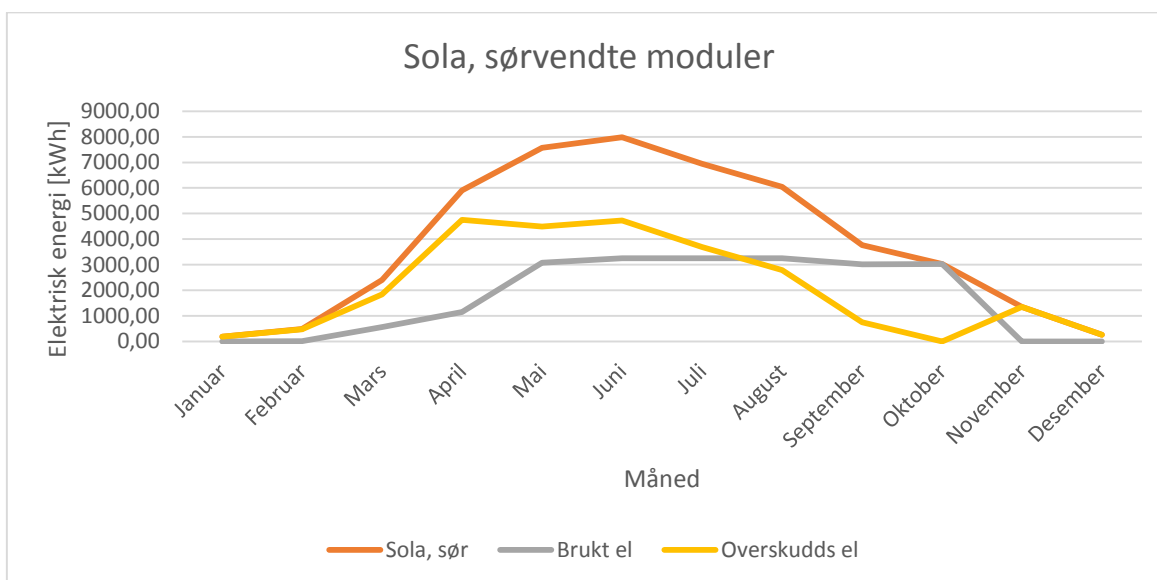


Figur 29: Viser månedlig sammenligning av forbruk og produksjon av elektrisk energi ved den årlige energibalansen på Sola.

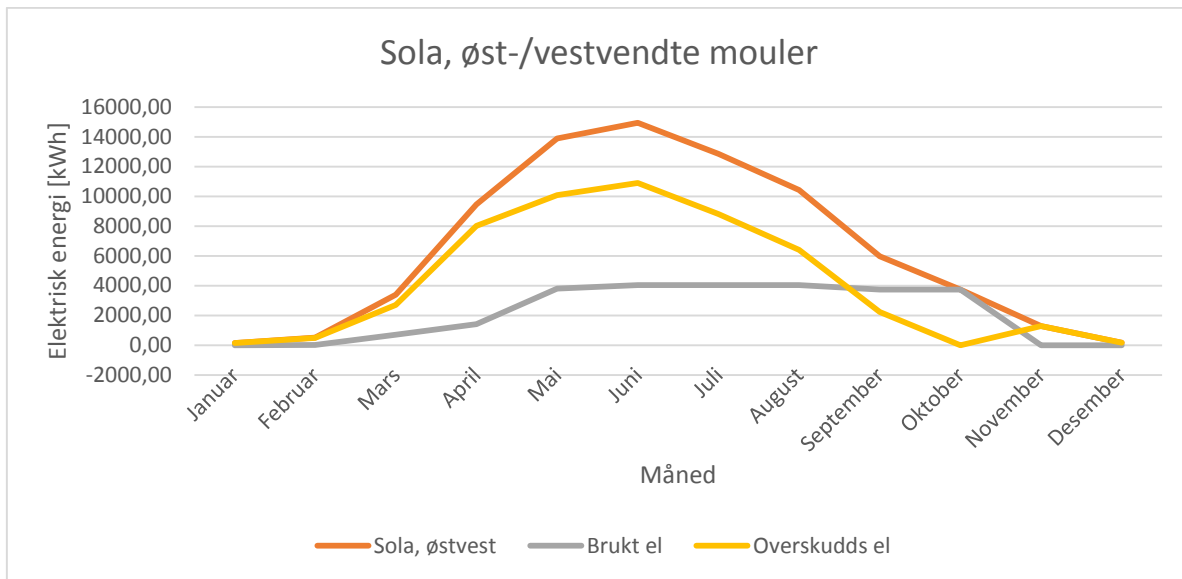
Månedlig energibalanse:

En månedlig utregning av formel 29 gir at traktoren kan drifte 230 dekar jorder med energien fra PV-anlegget med sørvendte moduler på Sola og 280 dekar jorder med østvestvendte moduler på Sola. Når jorder på disse størrelsene driftes ender det med et overskudd av elektrisk energi på 25 MWh med de sørvendte modulene, og på 51 MWh med de øst-/vestvendte modulene.

Dette gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 30 med sørvendte moduler og 31 med øst-/vestvendte moduler.



Figur 30: Viser månedlig sammenligning av forbruk og produksjon av elektrisk energi ved den månedlige energibalansen på Sola.



Figur 31: Viser månedlig sammenligning av forbruk og produksjon av elektrisk energi ved den månedlige energibalansen på Sola.

Hydrogentraktoren:

Tallene og henvisningene til måneder i tabell 27 gir et månedlig forbruk av hydrogen i traktoren som vist i tabell 30.

Tabell 30: Viser månedlig forbruk av hydrogen per dekar for hydrogentraktoren på Sola.

Måned	Månedlig forbruk [kg/daa]
Januar	0,0
Februar	0,0080
Mars	0,30
April	0,61
Mai	1,6
Juni	1,7
Juli	1,7
August	1,7
September	1,6
Oktober	1,6
November	0,0
Des	0,0
Formel:	28
Totalt:	11

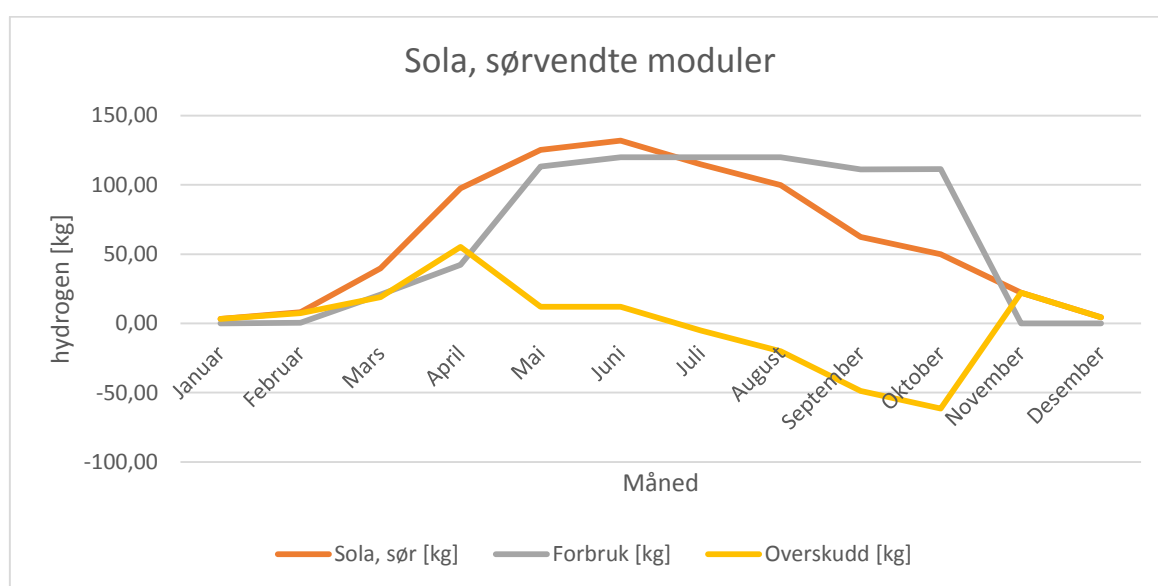
Basert på den produserte elektriske energien tilgjengelig ved elektrolysøren fra PV-anlegget gir dette den årlige produksjonen av hydrogen. Hydrogenet som kan produseres i løpet av et år gir igjen antallet dekar som kan driftes ved en årlig hydrogenbalanse. Dette er vist i tabell 31.

Tabell 31: Viser månedlige tall for elektrisk energi tilgjengelig til hydrogenproduksjon, produsert mengde hydrogen og arealene som kan driftes ved denne hydrogenproduksjonen.

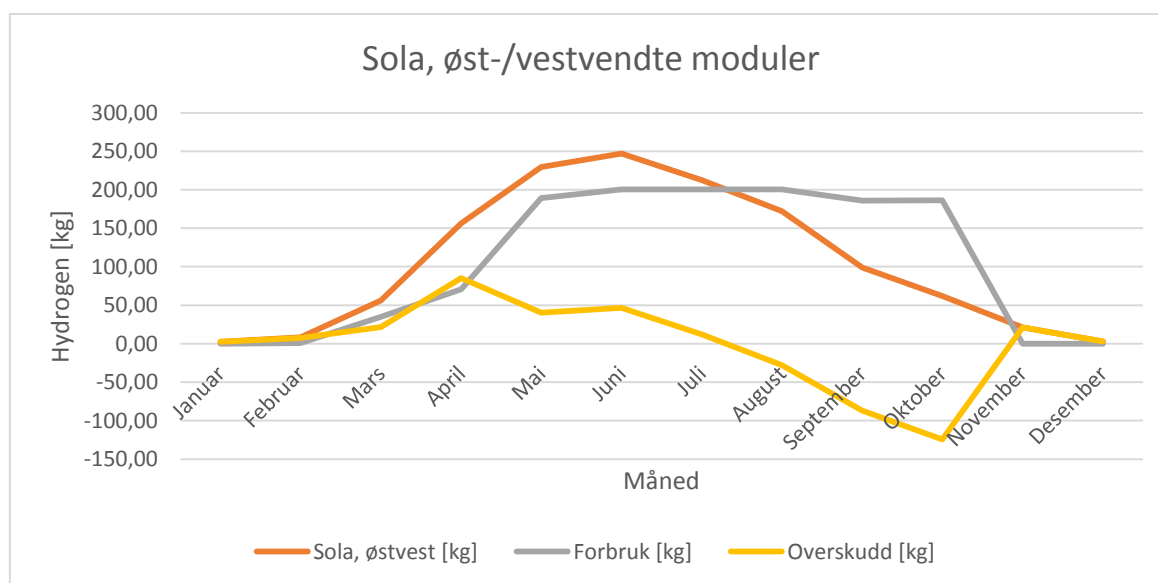
Retning på moduler:	Produsert elektrisitet [MWh]	Produsert hydrogen [kg]	Areal [daa]
Sørvendt	46	760	70
Øst-/vestvendt	77	1300	120
Formel:	---	---	29

Den årlige produksjonen av elektrisitet og hydrogen er beregnet som beskrevet i delkapittel 5.2: Sammenligning av energiforbruk og –produksjon.

Dette gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 32 med sørvendte moduler og 33 med øst-/vestvendte moduler.



Figur 32: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen på Sola.



Figur 33: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen på Sola.

6.3.4 Ås

Traktorbruken i Ås fører til en oversikt over tidsforbruket per dekar per år fordelt på jordbruksprosessene som vist i tabell 32.

Tabell 32: Viser årlig timesforbruk, årlig tidsforbruk per dekar og perioden for jordbruksprosessene i Ås.

Prosess	Ant timer	Tidsforbruk [t/daa]	Måned
Pløying	150	0,052	August/september/oktober
Steinplukking	70	0,024	April/mai/august/september
Harving	500	0,17	April/mai/august/september/oktober
Såing og gjødsling	200	0,069	April/mai/august/september
Delgjødsling	30	0,010	April/mai/juni
Sprøyting	200	0,069	April/mai/juni/juli/august/september/oktober
Tromling	100	0,035	April/mai/august/september
Formel:	---	27	---
Totalt:	1300	0,43	

Batteritraktoren:

Tidsforbruket og henvisningene til måneder i tabell 32 gir et månedlig forbruk av energi fra ladestasjonen som vist i tabell 33.

Tabell 33: Viser månedlig forbruk av elektrisk energi fra ladestasjonen for den batteridrevne traktoren i Ås.

Måned	Månedlig forbruk [kWh/daa]
Januar	0,0
Februar	0,0
Mars	0,0
April	1,9
Mai	1,9
Juni	0,49
Juli	0,47
August	3,5
September	3,5
Oktober	2,8
November	0,0
Desember	0,0
Formel:	28
Totalt:	15

Årlig energibalanse:

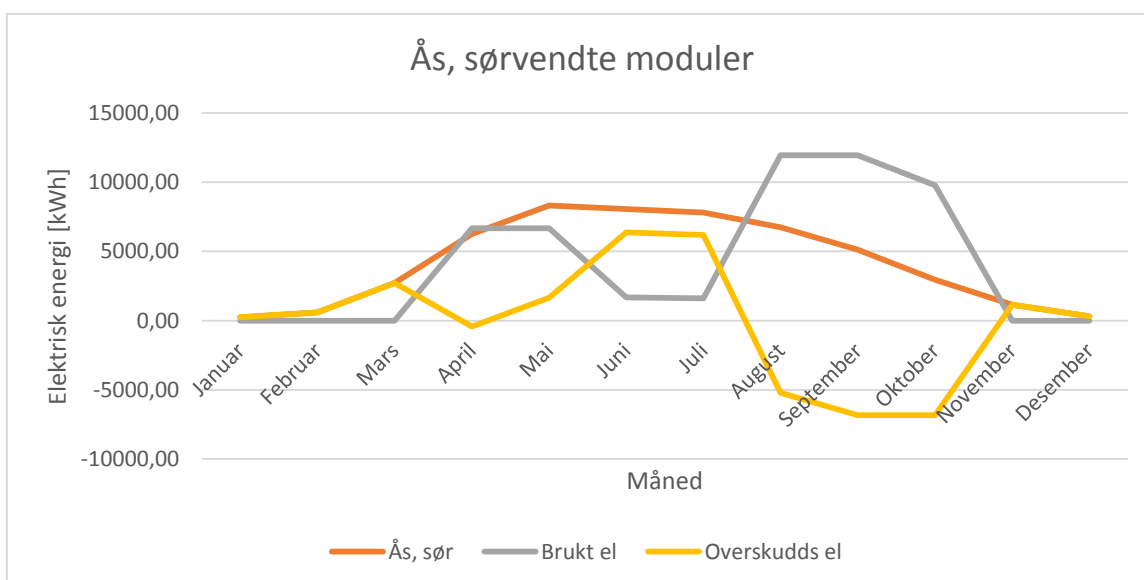
Basert på den produserte elektriske energien tilgjengelig ved ladestasjonen fra PV-anlegget, gitt i tabell 13, er arealet som kan driftes ved en årlig energibalanse for batteritraktoren som gitt i tabell 34.

Tabell 34: Viser årlig elektrisk energi ved ladestasjonen, og arealet som kan driftes ved årlig energibalanse i Ås.

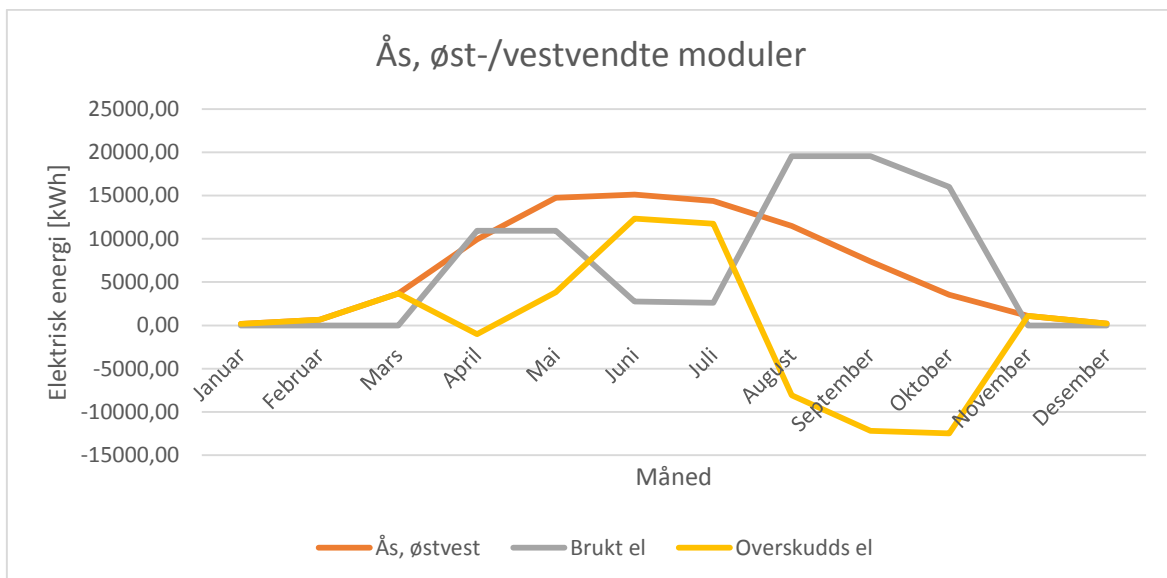
Retning på moduler:	Total produksjon [MWh/år]	Areal [daa]
Sørvendt	50	3400
Øst-/vestvendt	82	5600
Formel:	---	29

Den totale produksjonen av elektrisitet er beregnet som forklart i delkapittel 5.2: Sammenligning av energiforbruk og –produksjon.

Jordbruksarealene gitt i tabell 34 gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 34 for sørvendte moduler og 35 for øst-/vestvendte moduler.



Figur 34: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Ås.

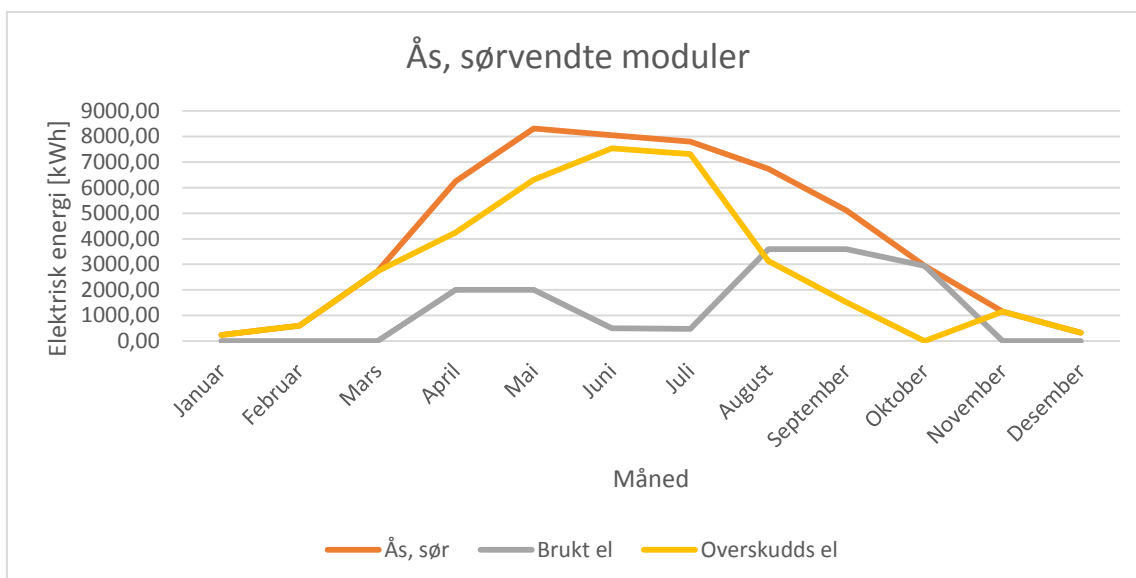


Figur 35: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den årlige energibalansen i Ås.

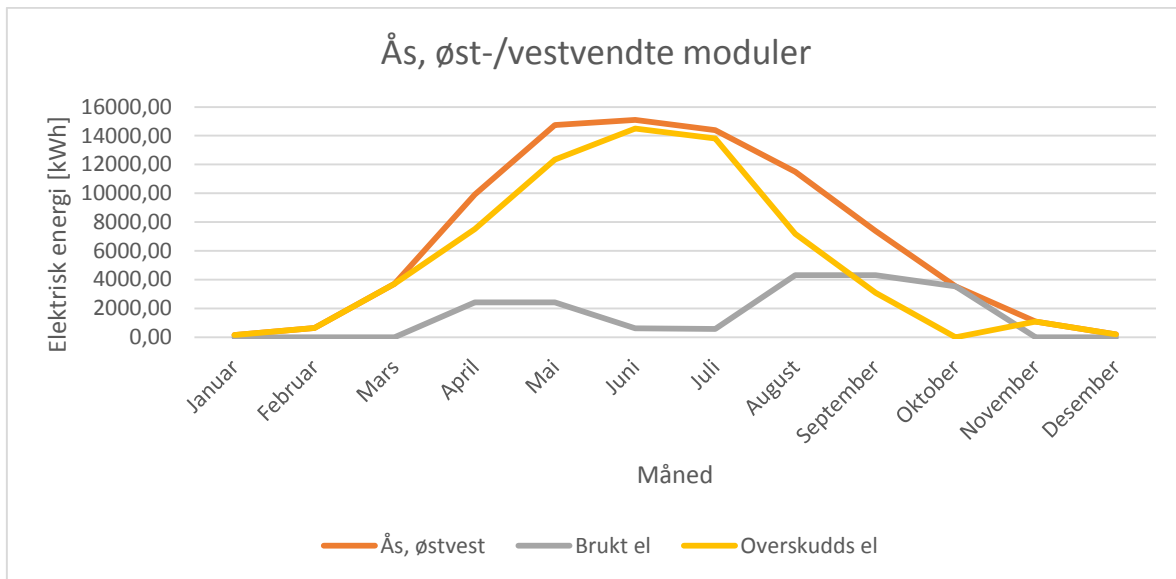
Månedlig energibalanse:

En månedlig utregning av formel 29 gir at traktoren kan drifte 1000 dekar jorder med energien fra PV-anlegget med sørvendte moduler i Ås og 1200 dekar jorder med østvestvendte moduler i Ås. Når jorder på disse størrelsene driftes ender det med et overskudd av elektrisk energi på 35 MWh med de sørvendte modulene, og på 64 MWh med de øst-/vestvendte modulene.

Dette gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 36 med sørvendte moduler og 37 med øst-/vestvendte moduler.



Figur 36: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Ås.



Figur 37: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av elektrisitet ved den månedlige energibalansen i Ås.

Hydrogentraktoren:

Tallene og henvisningene til måneder i tabell 32 gir et månedlig forbruk av hydrogen i traktoren som vist i tabell 35.

Tabell 35: Viser månedlig forbruk av hydrogen fra hydrogentraktoren i Ås.

Måned	Månedlig forbruk [kg/daa]
Januar	0,0
Februar	0,0
Mars	0,0
April	0,23
Mai	0,23
Juni	0,058
Juli	0,055
August	0,41
September	0,41
Oktober	0,34
November	0,0
Des	0,0
Formel:	28
Totalt:	1,7

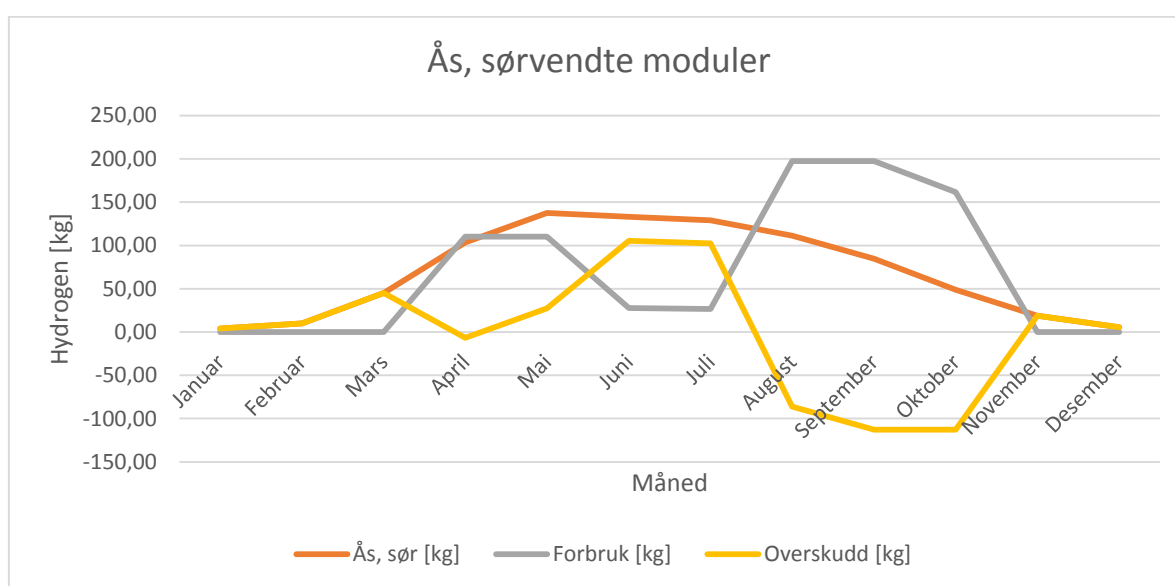
Basert på den produserte elektriske energien tilgjengelig ved elektrolysøren fra PV-anlegget gir dette den årlige produksjonen av hydrogen. Hydrogenet som kan produseres i løpet av et år gir igjen antallet dekar som kan driftes ved en årlig hydrogenbalanse. Dette er vist i tabell 36.

Tabell 36: Viser årlige tall for tilgjengelig elektrisk energi til hydrogenproduksjon, produsert mengde hydrogen, og arealene som kan driftes ved denne hydrogenproduksjonen.

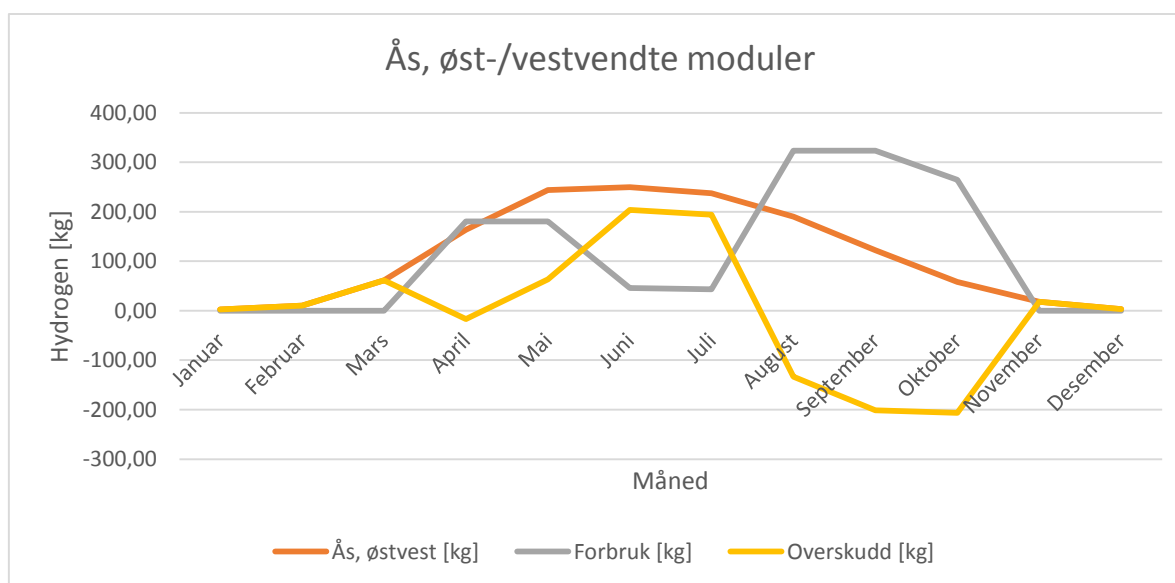
Retning på moduler:	Produsert elektrisitet [kWh]	Produsert hydrogen [kg]	Areal [daa]
Sørvendt	50	830	480
Øst-/vestvendt	82	1400	780
Formel:	---	---	29

Den årlige produserte elektrisiteten og hydrogenet er beregnet som forklart i delkapittel 5.2: Sammenligning av energiforbruk og –produksjon.

Dette gir en sammenligning mellom produksjon og forbruk gitt av grafene i figur 38 for sørvendte moduler og 39 for øst-/vestvendte moduler.



Figur 38: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Ås.



Figur 39: Viser en månedlig sammenligning av produksjon og forbruk av hydrogen i Ås.

6.3.5 Sammenligning av de ulike systemene

Ved hjelp av virkningsgradene til traktorene og de oppgitte virkningsgradene i delkapittel 5.3 er Well – to – wheel virkningsgradene til traktorsystemene funnet til å være som vist i tabell 37.

Tabell 37: Viser Well- to wheel virkningsgradene for de ulike traktorsystemene i denne oppgaven.

System:	Dieseltraktor	PV – Bat. traktor	PV - Hydrogentraktor	Nett – Bat. traktor
Med kraftuttak	0,23	0,06	0,02	0,60
Uten kraftuttak	0,14	0,04	0,01	0,37
Formel:	30	31	32	33

Tabell 27 viser at det er store forskjeller på de ulike WTW-virkningsgradene, hvor verdiene varierer fra 0,01 til 0,60.

7 Diskusjon

I dette kapittelet diskuteres resultatene gitt i kapittel 6. Første del av diskusjonen omhandler traktorene, praktisk utnyttelse av de elektriske traktorene og usikkerheten i beregningene av virkningsgrader og energiforbruk i traktorene. Deretter diskuteres resultatene for simuleringene for produsert energi fra PV-anlegget i de ulike områdene, energiflyt i ladestasjon og hydrogenproduksjonsstasjon og virkningsgraden til disse anleggene. Usikkerheten til produksjonen av solenergi er også diskutert i denne delen. Siste del tar for seg diskusjonen rundt resultatene for de ulike traktorsystemene som helhet, jordbruksarealene som kan driftes av de elektriske traktorene, samt WTW-virkningsgradene til systemene.

7.1 Traktorene

Dieseltraktoren:

Dieseltraktorens dieselforbruk ved ulike jordbruksprosesser er som forklart i delkapittel 1.2 utgangspunkt for energi- og effektbehovet til både batteritraktoren og hydrogentraktoren. Som vist i tabell 6 varierer dieselforbruket mye med hvilken jordbruksprosess som utføres, noe som gjør at forbruket til de elektriske traktorene også vil variere mye. Dette medfører store utfordringer i seg selv med tanke på dimensjonering av batteripakke og hydrogentank. Når traktoren brukes til jordbruksprosesser som krever mye energi/effekt vil det være behov for store energilagringseenheter og/eller mange påfyllinger av hydrogen eller bytter av batterier. Samtidig kan man for mindre energikrevende jordbruksprosesser kunne klare seg med mindre lagringseenheter og/eller kjøre traktoren på en enhet en hel dag.

Resultatene for dieseltraktoren i delkapittel 6.1.1 viser at virkningsgraden er forskjellig om redskapene til traktoren benytter kraftuttaket eller ikke ved de ulike jordbruksprosessene. Bruk av kraftuttak øker virkningsgraden til dieseltraktoren, og reduserer dermed energibehovet. Dieseltraktoren har en relativt lav virkningsgrad. Dette gir et godt utgangspunkt for elektrifisering av traktoren, da de elektriske komponentene ved en sammenligning av virkningsgradene gitt i delkapittel 2.1.2 og 2.2.2 har vist seg å ha en bedre virkningsgrad enn de mekaniske komponentene i dieseltraktoren.

Batteritraktoren:

En sammenligning av resultatene for virkningsgradene i delkapittel 6.1.1, 6.1.2 og 6.1.3 viser at den batteridrevne traktoren er den traktoren høyest virkningsgrad av de tre traktorene. Ved å gå fra dieseltraktoren til batteritraktoren får man en økning i virkningsgrad fra 0,27 til 0,73 med kraftuttaket og fra 0,16 til 0,45 uten kraftuttaket. Spesielt når redskapene til traktoren bruker kraftuttaket er dette en relativt stor økning i virkningsgrad, noe som gir en reduksjon i energiforbruket. Dette kan også sees ved en sammenligning av den innfyrte effekten til dieseltraktoren i tabell 6 og fra batteriene til batteritraktoren i tabell 7. Sett kun fra et energistandpunkt er det med andre ord en bedre utnyttelse av energien å ta i bruk batterier og elektrisk energi istedenfor diesel.

Når det kommer til den mer praktiske utnyttelsen av batterier, kan det sees fra tabell 8 at det med dagens teknologi kan være vanskelig å forsvare batteribruk istedenfor dieselbruk. Ved 12 timers bruk av traktoren til den mest energikrevende prosessen, pløying, er det vist at man vil trenge 6 batteribytter ved bruk av de 170 kWh batteripakkene og 12 batteribytter ved bruk av de 85 kWh batteripakkene. Dette tilsvarer et batteribytte henholdsvis annenhver time eller hver time. Ettersom

kjøringen til og fra jordet ikke er tatt med i denne utregningen fører dette til korte perioder ute på jordet.

Selv om batteritraktoren med dagens teknologi ikke er praktisk ved pløyingen, kan man se fra tabell 8 at man ved 12 timers bruk av traktoren til de andre jordbruksprosessene har behov for å bytte batterier maksimalt 3 ganger (170 kWh batteripakker). Tabell 8 viser også at det ved fem av jordbruksprosessene, med 170 kWh batteripakker, kun er behov for en batteripakke hele dagen. Dette viser at det kan være praktisk med bruk av den batteridrevne traktoren ved disse jordbruksprosessene, også med dagens teknologi.

I delkapittel 6.1.2 er det vist at bruk av navmotorer i traktoren øker virkningsgraden til batteritraktoren fra 0,73 til 0,77 ved bruk av kraftuttaket og fra 0,45 til 0,60 uten kraftuttaket. Spesielt når redskapene til traktoren ikke benytter kraftuttaket øker virkningsgraden relativt mye. Dette er interessant satt opp mot avkrysningen i tabell 6 som viser hvilke prosesser som bruker kraftuttaket. Tabellen viser at kraftuttaket ikke benyttes ved pløyingen. Pløyingen er som vist i tabell 6 den jordbruksprosessen som krever mest effekt/energi. Ved bruk av navmotorene reduseres traktorens effektbehov fra batteriene med rundt 25 % fra 78 kW ved bruk av den «konvensjonelle» batteridrevne traktoren til 58 kW for navtraktoren. Denne reduksjonen i effektbehovet fører til at traktoren kan bruke en 170 kWh batteripakke mindre enn for batteritraktoren det er sett på i hovedresultatene av oppgaven.

Hydrogentraktoren:

Resultatene i delkapittel 6.1.3 viser at ved å bytte ut batteripakken med en brenselcelle og hydrogentank, senkes virkningsgraden på den elektriske traktoren til 0,35 ved bruk av kraftuttaket og 0,22 uten kraftuttak. Dette er høyere enn dieseltraktoren, og en hydrogentraktor vil derfor fra et energistandpunkt være et mer energisparende valg enn dieseltraktoren.

Tabell 9 viser at lagringsbehovet for hydrogen ved 12 timers traktorbruk for alle jordbruksprosesser er mulig å gjennomføre hvis det kun fokuseres på massen av hydrogen. Det høyeste lagringsbehovet på 130 kg i en traktor, er mulig ettersom massen til traktoren i seg selv er stor. Problemene er massen og volumet av selve hydrogentanken. Som eksempel er det i denne oppgaven sett på en 200 liters tank. Med de ulike tankene det er sett på i denne oppgaven viser tabell 10 at det med en 200 liters tank kan lagres rundt 5-8 kg hydrogen, og tankens totale masse vil være mellom 100 kg og 0,5 tonn. Dagens teknologi tillater kun at en liten andel av hydrogenbehovet kan lagres i traktoren om gangen, og tanken i seg selv tar opp et stort volum og har en stor masse.

Tabell 10 og 11 viser at man ved bruk av metallhydridtanken under høyt trykk får lagret mest hydrogen per tank, noe som reduserer antallet påfyllinger i løpet av en arbeidsdag i forhold til de to andre tankene. Allikevel er det ved den mest energikrevende prosessen, pløying, behov for å fylle tanken hele 15 ganger i løpet av en 12 timers dag. Dette tilsvarer fylling av tanken mer enn en gang i timen, og disse tallene er uten forbruket av hydrogen på kjøringen til og fra jordet. Med metallhydridtanken er det kun fem av jordbruksprosessene hvor man kan fylle tanken mindre enn tre ganger i løpet av en dag. For de andre tankene må man fylle oftere enn for den høytrykks metallhydridtanken, og forskjellene mellom de ulike tankene blir større når energibehovet til traktoren øker. Massen til tanken ved bruk av komprimert gass blir mindre enn for de to metallhydridløsningene, og kan derfor egne seg bedre hvis man har god plass i traktoren.

Sammenligning av traktorene:

For de to elektriske traktorene er hovedproblemet pløyingen av jordene, og prosessen blir vanskelig å gjennomføre med teknologien som er tilgjengelig i dag. Det er den batteridrevne traktoren som fremstår som den mest nærliggende løsningen med teknologien som eksisterer nå, og traktoren kan fint brukes til traktor nummer to ved bruk av de 170 kWh batteripakkene allerede i dag. Med traktor nummer to menes en traktor som brukes til de minst energikrevende jordbruksprosessene, og at man benytter traktor nummer en til de tyngste prosessene. Av jordbruksprosessene som det er fokusert på i denne oppgaven vil den batteridrevne traktoren kunne brukes med bare tre tilgjengelige batteripakker til alle prosesser utenom pløyingen.

For forfatteren av denne oppgaven virker det opplagt at det kun er teknologien som setter begrensninger for mulighetene for elektrifisering av traktoren. Både den batteridrevne og den hydrogendrevne traktoren vil være et godt alternativ til dieseltraktoren dersom batteripakkene og hydrogentankene blir videreutviklet slik at de kan lagre mer energi/hydrogen. Dette gjelder spesielt når vi ser på den batteridrevne traktoren. Med den utviklingen som er på både batterier, brenselceller og hydrogenlagring i dag er det godt mulig at det kan produseres slike traktorer om 5 – 10 år.

Usikkerhet:

Det er flere feilkilder i beregningene på traktorene, hvor de største er forbruket av diesel og virkningsgraden til de ulike traktorene.

Det er gjort lite forskning på dieselforbruket ved ulike jordbruksprosesser i landbruket i Norge, og tallene i denne oppgaven er derfor basert på dieselforbruket ved et lite antall gårder. Forbruket vil variere fra gård til gård på bakgrunn av kjøreforhold, avstander mellom ulike jorder og gårdsbygninger og med individuelle kjørestiler. Rapporten som dieselforbruket er tatt fra i denne oppgaven virker allikevel som en god kilde, da de ved sammenligning med forskning på dette i andre land har fått ganske like tall.

Virkningsgradene til traktorene vil også variere med bruken av traktoren, og er avhengig av flere forhold på gården, jordbruksprosessen som utføres, underlag og føreren. Det er gjort en del forskning på virkningsgraden til ulike komponenter i dieseltraktoren, og dette er brukt som bakgrunn for virkningsgradene satt i denne oppgaven. Det vil allikevel være en del usikkerhet i disse tallene, da virkningsgradene er satt til faste tallverdier istedenfor å variere slik som de vil gjøre i virkeligheten. For den batteridrevne og den hydrogendrevne traktoren er det tatt utgangspunkt i virkningsgrader gitt i ulike kilder, og usikkerheten vil derfor være større for virkningsgradene til disse enn til de for dieseltraktoren.

Fordi dette kun er et mulighetsstudie, og ikke en prosjektering/testing av virkelige traktorer er usikkerheten i disse verdiene innenfor rimelighetens grenser. Uten mulighet til å måle de ulike verdiene i praksis, vil det ikke være mulig å sette nøyaktige tallverdier til de ulike parameterne.

7.2 Solenergi, ladestasjon og hydrogenproduksjonsstasjon

Solenergi:

Virkningsgraden til PV-anlegget vist i tabell 12 er lavere enn det som var forventet ved oppstart av denne oppgaven, og er på 9 %. Noe av grunnen kan være at det i simuleringene er valgt moduler med virkningsgrad i nedre sjikt av virkningsgradene som er vanlige for silisiumsolceller oppgitt i delkapittel 3.1.4. Nyere moduler har gjerne høyere virkningsgrad enn det som er brukt i denne oppgaven, og ville gitt en bedre virkningsgrad for systemet som helhet. I tillegg til dette er virkningsgraden funnet i denne oppgaven det årlige gjennomsnittet. Virkningsgraden til PV-anlegget vil være høyere om sommeren enn om vinteren, da det ikke er snø på modulene om sommeren.

Sammenligningen av produsert energi i tabell 13 viser at det i alle områder blir den største produksjon av elektrisitet ved bruk av øst-/vestvendte moduler. Dette har den naturlige årsaken at modularealet er dobbelt så stort som ved sørvendte moduler, og modulene derfor fanger opp mer av den innstrålte energien på grunn av spredningen av modulene. Produksjonen av elektrisitet er størst på sommeren i alle områdene, noe som er som forventet. Det produseres minst energi i Balsfjord, hvor produksjonen er mer konsentrert om sommeren enn i de andre områdene. Dette har den naturlige årsaken at Balsfjord ligger nord for Polarsirkelen, og at det derfor er perioder uten sol om vinteren. Den produserte mengden elektrisitet er allikevel av betydelig størrelse. Med en årlig produksjon av elektrisk energi på 34 MWh med sørvendte moduler og 59 MWh med øst-/vestvendte moduler dekker dette forbruket til mellom 2 og 4 norske husholdninger (2012) ved sammenligning med det gjennomsnittlige forbruket per husholdning gitt i delkapittel 1.1. Produksjonen av elektrisk energi er i de andre områdene ganske like, noe som skyldes at de ligger på tilnærmet samme breddegrad.

Simuleringene for skyggetilfellene i Ås, spesialtilfelle 1 og 2 i tabell 14, viser at produksjonen av elektrisitet går noe ned. Tapet av elektrisk energi er på rundt 1-5 % av det som produseres ved sørvendte moduler uten skyggelegging. Det tapes mest om vinteren, noe som skyldes at solen står lavere på himmelen og derfor lettere vil havne bak skyggeelementene.

Simuleringen gjort for den nyere låven, spesialtilfelle 3 i tabell 14, viser at den årlige produksjonen øker. Dette skyldes at taket er lavere og større, og derfor fanger opp mer av den innstrålte energien. Denne simuleringen ble gjort uten skyggelegging. Tapene på grunn av skyggelegging vil være et større problem jo lavere låven er, ettersom solen lettere havner bak skyggeelementer.

Simuleringene for ulike vekselrettere, spesialtilfelle 4 og 5 i tabell 14, viser at det blir en liten reduksjon av produsert elektrisitet sammenlignet med produksjonen ved bruk av strengvekselrettere (tilfelle 0). Reduksjonen er størst ved bruk av mikrovekselrettere, og så å si neglisjerbar ved bruk av sentralvekselretter. Det kan virke som om strengvekselrettere er den beste løsningen for et slikt system, men det kan ikke konkluderes med det ut fra resultatene i denne oppgaven.

Ladestasjon og hydrogenstasjon:

Resultatene i delkapittel 6.2.2 viser at virkningsgraden til ladestasjonen er på 98 %, og er relativt høy. Dette skyldes at ladestasjonen i hovedsak kun er en overføring av elektrisk energi til batteriet. Resultatene i delkapittel 6.2.3 viser at virkningsgraden er lavere for hydrogenproduksjonsstasjonen, og virkningsgraden er på 63 %. Produksjon av hydrogen ved elektrolyse er en energikrevende prosess med store varmetap, og det trengs derfor mer elektrisitet til hydrogenproduksjonen enn til oppladningen av batteriene. Tabell 15 og 16 viser at effekten som trengs for å lade batterier og

produsere hydrogen varierer i takt med forbruket til traktoren, og er større for hydrogenstasjonen enn ladestasjonen.

Hvis det ikke blir produsert noe elektrisitet fra PV-anlegget når batteriene lades, vil det bli et maksimalt effektbehov på 46 kW fra nettet i pløyesesongen. Dette vil komme i tillegg til det vanlige forbruk ved gården, og være kun noen få dager/uker. Det vil derfor være behov for en 50 kW hurtiglader ved gården, og det økte effektbehovet vil være på 50 kW. Et økt effektbehov på 50 kW inn til gården, vil som forklart i delkapittel 3.4 ofte føre til utbygging for å styrke nettilkoblingen på gården. Som forklart i delkapittel 3.4 er dette gjennomførbart så lenge det er et tilgjengelig mellomenningsnett og en transformatorstasjon med tilgjengelig kapasitet i nærområdet. Er dette tilgjengelig er spørsmålet hvor store kostnader gårdseier ønsker å legge inn i anlegget. En alternativ løsning kan være å se på langtidslagring av energi, men dette er det ikke fokusert på i denne oppgaven.

Det tilsvarende effektbehovet for hydrogenstasjonen vil være på over 330 kW. Det er i hovedsak tenkt at hydrogenproduksjonen kun skal bruke elektrisitet fra PV-anlegget, og da vil man slippe unna problemene relatert til nettkapasiteten.

Usikkerhet:

Det er noe usikkerhet i den estimerte elektrisitetsproduksjonen fra PV-anlegget, da data for simuleringen er basert på genererte data, og ikke måledata fra områdene det blir sett på i denne oppgaven. Det vil alltid være en del usikkerhet i simuleringer av solenergi, da det er umulig å forutsi hvordan været bli i fremtiden og varierer fra år til år.

7.3 Helhetlig bilde

7.3.1 Energi- og hydrogenbalanser i de ulike områdene

Resultatene i kapittel 6.3.1 – 6.3.4 viser hvor store jordbruksarealer som kan driftes ved de tre forskjellige energi- og hydrogenbalansene for traktorsystemene som er gjort i denne oppgaven. I diskusjonen under vil resultatene for de forskjellige balansene diskuteres på generell basis, samt i korte trekk for de spesifikke områdene.

Det er viktig å se på forskjellene mellom de ulike plantetyper som dyrkes i jordbrukene det sees på i denne oppgaven før resultatene i de ulike områdene kan diskuteres. Det er sett på to områder med mye grasdyrking, Balsfjord og Sola, og det er derfor sett på traktorbruk i forhold til grasdyrking i disse to områdene. Det er også sett på to områder med mye korndyrking, Verdal og Ås, og det er derfor sett på traktorbruk i forhold til korndyrking i disse områdene.

På gressdyrkende jordbruk utføres høstingen med traktoren, mens det ved korndyrkende jordbruk brukes skurtreskere til innhøstingen. Dette gir en forskjell i både årlig tidsbruk og energibruk per dekar dyrket jorde for traktoren. På begge de gressdyrkende jordbrukene brukes traktorene i over en time per dekar i året, og forbruket av elektrisk energi fra batteriet til traktoren er på over 60 kWh per dekar i året. Tilsvarende tall for de korndyrkende jordbrukene er under en halvtime per dekar i året og under 20 kWh per dekar i året. Dette er vist i de to første tabellene i delkapittel 6.3.1 – 6.3.4.

Månedlig energibalanse for den batteridrevne traktoren:

Den månedlige energibalansen gir ved en sammenligning av den produserte elektriske energien i tabell 13, og forbruket ved den månedlige energibalansen gitt i delkapittel 6.3.1 – 6.3.4 en relativt dårlig utnyttelse av den produserte energien på 7,6 – 46 %. Dette kommer av at det er måneden hvor produsert energi fra PV-anlegget er like stor som forbruket av energi fra traktoren som bestemmer hvor store jordbruksarealer som kan driftes av den batteridrevne traktoren. Ettersom man ikke kan redusere modularealet til PV-anlegget uten samtidig måtte redusere jordbruksarealet som kan driftes av traktoren, bør denne fremgangsmåten for å finne jordbruksarealene som kan driftes av traktoren kun benyttes dersom den produserte elektrisiteten kan brukes til noe annet på gården.

Ved den månedlige energibalansen kan den batteridrevne traktoren drifte jordbruksarealer som er middels store, en oversikt over arealene og utnyttelsen av energien fra PV-anlegget for de ulike områdene er gitt i tabell 38.

Tabell 38: Viser en oversikt over jordbruksarealene som kan driftes av den batteridrevne traktoren ved en månedlig energibalanse og hvor stor andel av den produserte elektrisiteten fra PV-anlegget som benyttes ved driften av disse jordbruksarealene.

Plassering av jordbruk	Areal batteridrevet traktor (månedlig energibalanse)	Utnyttelse av produsert energi fra PV-anlegg.
Balsfjord	130 – 140 daa	26 – 28 %
Verdal	270 – 400 daa	7 – 15 %
Sola	230 – 270 daa	34 – 46 %
Ås	1000 – 1200 daa	23 – 31 %

Tabell 13 viser at Balsfjord er det området med lavest produksjon av elektrisk energi fra PV-anlegget. I området dyrkes det også gress, som er den mest energi- og tidskrevende plantetypen å drifte av plantetypene det er sett på i denne oppgaven. Dette gjør at jordbruksarealene som kan driftes med de elektriske traktorene i Balsfjord blir lavere enn de andre områdene. Tabell 17 og 18 viser at traktorbruken i Balsfjord er konsentrert til juni, juli og august, noe som gjør at forbruket til traktoren passer godt tidsmessig med produksjon av elektrisitet ved PV-anlegget. Balsfjord er det området hvor det kan driftes det minste jordbruksarealet med den batteridrevne traktoren ved denne balansen, men det kan allikevel driftes mellomstore jorder i dette området og utnyttelsen av energien er relativt god sammenlignet med utnyttelsen i de andre områdene.

Verdal er et korndyrkingsområde, som er den plantetypen hvor det er færrest arbeidstimer for traktoren per daa per år, og hvor traktoren bruker minst energi per dekar per år. I tillegg er dette et av de områdene hvor det produseres mest elektrisk energi fra PV-anlegget. Dette fører til at Verdal er området hvor det kan driftes de nest største jordbruksarealene ved hjelp av de elektriske traktorene. Traktoren har i Verdal en lang tidsperiode hvor den brukes, fra april til november, og brukes mindre om sommeren enn den gjør på våren og høsten. Dette gjør at traktorbruken ikke faller like godt sammen med produksjonen fra PV-anlegget som det gjør i Balsfjord, og utnyttelsen av den produserte elektrisiteten er derfor den laveste av alle områdene.

Sola har den nest laveste produksjonen av elektrisitet fra PV-anlegget av de områdene det er sett på i denne oppgaven. Det dyrkes mest gress i dette området, noe som medfører at arealene som kan driftes av en elektrisk traktor blir det nest laveste av gårdene det blir sett på i denne oppgaven. Traktorbruken har en ganske god spredning utover året, men er ganske høy mot høsten. Dette gjør at traktorbruken vil passe godt over ens med produksjonen fra PV-anlegget med unntak av på høsten.

Utnyttelsen av den produserte elektrisiteten fra PV-anlegget blir derfor den høyeste sammenlignet med de andre områdene.

Ås er et av områdene hvor det produseres mest energi fra PV-anlegget, og det er i dette området sett på en korndyrkende gård. Energibruken per dekar per år er lavest i Ås. Kombinasjonen av den høye produksjonen av elektrisk energi fra PV-anlegget og den lave energibruken til traktoren fører til at det er i Ås de største jordbruksområdene kan driftes. Traktorbruken er fordelt utover året, men er størst på våren og høsten. Dette fører til at forbruket til traktoren og produksjon fra PV-anlegget ikke sammenfaller like godt som på Sola, og utnyttelsen av den produserte energien ved PV-anlegget blir derfor noe lavere.

Årlig energibalanse for den batteridrevne traktoren:

Den årlige energibalansen gir en større utnyttelse av energien produsert ved PV-anlegget enn den månedlige energibalansen, da det totale forbruket til traktoren er like stor som produksjonen ved PV-anlegget. Det kreves imidlertid mer nettkapasitet, da behovet for overføring av elektrisitet til og fra kraftnettet blir større.

Jordbruksarealene som kan driftes av den batteridrevne traktoren dersom det blir tatt utgangspunkt i en årlig energibalanse er middels store til store. Dette gir store muligheter til å drifte de fleste jordbruk ved hjelp av en batteridrevet traktor, og det vil i mange tilfeller bli et stort overskudd av elektrisk energi. Jordbruksarealene som kan driftes ved hjelp av en batteridrevet traktor med den elektriske energien fra PV-anlegget er gitt i tabell 39.

Tabell 39: Viser en oversikt over jordbruksarealene som kan driftes av den batteridrevne traktoren ved en årlig energibalanse i de ulike områdene.

Plassering av jordbruk	Areal batteridrevet traktor (årlig energibalanse)
Balsfjord	540 – 900 daa
Verdal	3000 – 4700 daa
Sola	500 – 840 daa
Ås	3400 – 5600 daa

Ettersom det i Balsfjord det er den laveste produksjonen av elektrisk energi fra PV-anlegget og at det i Balsfjord dyrkes den mest energikrevende plantetypen, gress, blir jordbruksarealene som kan driftes av den batteridrevne traktoren i Balsfjord en av de minste sammen med jordbruksarealet i Sola. Et jordbruksareal på mellom 540 daa og 900 daa er fremdeles relativt stort, sammenlignet med det gjennomsnittlige jordbruksarealet i Troms som er på 242 daa.

Den høye produksjonen av elektrisk energi og det faktum at det er sett på et korndyrkende jordbruk i Verdal, gjør at jordbruksarealene som kan driftes av den batteridrevne traktoren i Verdal blir store. Jordbruksarealer på mellom 3000 daa og 4700 daa er godt over det gjennomsnittlige jordbruksarealet i Nord-Trøndelag som er på 266 daa, og de aller fleste jordbrukene i Verdal bør derfor kunne driftes av en batteridrevet traktor.

På Sola er det årlige energiforbruket til traktoren per areal størst. Selv om produksjonen fra PV-anlegget er relativt høyt, får energiforbruket innvirkning på hvor store jordbruksarealer som kan driftes av den batteridrevne traktoren. Jordbruksarealene som kan driftes av traktoren er derfor det laveste av alle områdene det er sett på, men er allikevel høye i forhold til gjennomsnittsjordbruksarealet i Rogaland som er på 225 daa.

Ås er det området hvor det kan driftes de største jordbruksarealene med den batteridrevne traktoren. Dette er ikke overraskende, i og med at produksjonen fra PV-anlegget er høyt og det årlige energiforbruket til traktoren per dekar er det laveste. Gjennomsnittsjordbruket i Oslo og Akershus er på 350 daa, og er mindre enn jordbruksarealene som det er funnet at den batteridrevne traktoren kan drifte i Ås.

Årlig hydrogenbalanse for hydrogentraktoren:

Det at elektrisiteten produsert ved PV-anlegget brukes til produksjon av hydrogen, og bruken av hydrogen i traktoren reduserer jordbruksarealene som kan driftes av den elektriske traktoren til rundt 14 % i forhold til den batteridrevne traktoren (ved årlig energibalanse). Systemet som helhet er mer fleksibelt for variasjoner i produksjonen til PV-anlegget enn systemet med den batteridrevne traktoren, da produksjon og forbruk ikke er like tidsavhengige. Hydrogenet kan langtidslagres og gjør at mulighetene blir større for å tilpasse PV-anleggets størrelse til behovet for hydrogen i forhold til jordbruksarealene som skal driftes ved en gitt gård. Systemet er også uavhengig av nettkapasiteten, ettersom all produsert elektrisitet blir benyttet til produksjon av hydrogen, og det derfor ikke blir noen overføring av elektrisk energi til nettet.

Jordbruksarealene som kan driftes av den hydrogendrevne traktoren med hydrogenproduksjonen gitt av PV-anleggets produksjon er gitt i tabell 40.

Tabell 40: Viser en oversikt over jordbruksarealene som kan driftes av hydrogentraktoren i de ulike områdene.

Plassering av jordbruk	Areal hydrogentraktor (årlig balanse av produsert og forbrukt hydrogen)
Balsfjord	74 – 120 daa
Verdal	420 – 660 daa
Sola	70 – 120 daa
Ås	480 – 780 daa

I de to grasdyrkende områdene, Balsfjord og Sola, er jordbruksarealene som kan driftes relativt små, og mindre enn gjennomsnittsarealene på jordbrukene i fylkene. Jordbruksarealene som kan driftes er fortsatt i størrelsesorden av et lite til middels stort jordbruk, og systemet med hydrogentraktoren kan derfor benyttes ved mange av jordbrukene i områdene.

I de to korndyrkende områdene, Verdal og Ås, er jordbruksarealene som kan driftes av hydrogentraktoren relativt store. Arealene er i begge områdene større enn gjennomsnittsjordbruket i fylkene, og systemet med hydrogentraktoren kan derfor benyttes i flere tilfeller enn i Balsfjord og på Sola.

Sammenligning:

Resultatene som er diskutert i dette delkapittelet viser tydelig at det i alle de undersøkte områdene og med de undersøkte traktorene kan driftes mellomstore til store jordbruksarealer. De aller fleste jordbruksarealene gitt i tabellen i vedlegg 6 for de ulike områdene (Troms, Nord-Trøndelag, Rogaland og Akershus) vil kunne driftes med elektriske traktorer. Jordbruksområdene funnet i denne oppgaven er relativt store sammenlignet med arealene gitt i vedlegg 6. Dette åpner for at man ved mindre jordbruk enten kan bruke den overskuddet av produserte elektrisiteten til andre formål på gården, til storskala energilagring på gården eller kan redusere størrelsen på PV-anlegget og dermed spare

penger. Ved storskala energilagring på gården, gjennom for eksempel større stasjonære batteripakker, kan man bruke den lagrede energien til «peak-shaving» på gården. Med peak-shaving menes det at den lagrede energien brukes for å kutte effekttoppene av effekten som trekkes fra nettet på gården.

Retningen på modulene i PV-anlegget har mye å si for hvor store jorder som kan driftes uavhengig av hvilken traktor og sammenligning som benyttes. Det vil kunne driftes større jorder av de øst-/vestvendte modulene, da det er med denne retningen som gir mest produsert energi gjennom året. Unntaket fra denne regelen er ved den månedlige sammenligningen i Verdal. Dette skyldes at det i den måneden hvor forbruket til traktoren og produksjon fra PV-anlegget blir like store er produksjonen større ved bruk av sørvendte moduler enn ved øst-/vestvendte moduler.

Usikkerhet:

Ettersom enhver låve og ethvert jordbruk er forskjellig vil også produksjonen til PV-anlegget og forbruket til traktoren være ulikt for ethvert jordbruk. Utgangspunktet for forbruksmønsteret til traktoren er tatt fra kun en gård i hvert av områdene, og vil måtte tilpasses til hver enkelt gård for å vurdere om disse systemene vil egne seg på en gitt gård.

Hvor store jorder man kan drifte med en elektrifisert traktor på en gitt gård avhenger av to ting: hvor mye elektrisitet som produseres fra PV-anlegget og hvordan forbruksmønsteret til traktoren er på gården. Produksjonen er avhengig av størrelsen og plassering av låven, antall, type og oppbygning av moduler og invertere og skyggeleggingen av modulene. Forbruksmønsteret er avhengig av plasseringen av jordene, topografien til jordene, plantetyper, individuelle kjøremønstre og andre lokale forhold.

7.3.2 Sammenligning av de ulike systemene

Resultatene i avsnitt 6.3.5 viser at for alle de ulike systemene er WTW-virkningsgraden lavere når redskapene til traktoren ikke bruker kraftuttaket enn med bruk av kraftuttaket.

Systemene som kommer dårligst ut av sammenligningen i tabell 37 er batteritraktoren og hydrogentraktoren når den elektriske energien kommer fra PV-anlegget. Spesielt hydrogentraktoren kommer dårlig ut av det, ettersom produksjon og forbruk av hydrogen har lavere virkningsgrad enn oppladning og utladning av batteriene til den batteridrevne traktoren. Det er også verdt å merke seg at om den batteridrevne traktoren benytter strøm fra nettet til oppladningen av batteriene, er virkningsgraden høyere for systemet med batteritraktoren enn for systemet med dieseltraktoren. På grunn av den gode WTW-virkningsgraden kan bruk av strøm direkte fra kraftnettet til oppladningen av batteriene virke som et mer effektivt system. Da vil imidlertid ytelsesproblemer til det lokale strømnettet, som beskrevet i delkapittel 3.4, være et problem.

Den sammenligningen som ikke er gjort i denne oppgaven er på utslipp, og som nevnt i delkapittel 1.1, slippes det ut 2,6 kg CO₂ fra traktoren per liter forbrent diesel. Sammenlignet med de andre systemene som ikke har noen utslipp, er dette mye. Her er det forutsatt at elektrisiteten på kraftnettet er produsert av norsk vannkraft uten utslipp. Det er også verdt å nevne at strømmen produsert i PV-anlegget er lokalprodusert, miljøvennlig kraft. Det er antageligvis også innsparinger ved bruke PV-anlegget i sparte strømregninger, nettleie og dieselforbruk.

7.4 Forslag til videre arbeider

Resultatene i denne oppgaven viser at det er store muligheter for å drifte jordbruksarealer i de aller fleste størrelsesordener ved hjelp av elektrifiserte traktorer som lades fra et PV-anlegg på låvetaket. Ved flere mindre og mellomstore jordbruk vil det bli et overskudd av elektrisk energi fra PV-anlegget. En spennende videreføring av denne oppgaven kan derfor være å se på forbruket av elektrisitet ved hele jordbruket, med gårdsbygninger, elektriske traktorer og ulike maskiner ved gården opp mot den produserte energien på låvetaket. Hvordan vil perioder hvor det er overskudd av elektrisk energi i forhold til den batteridrevne traktorens forbruk sammenfalle med forbruket ellers på gården? Kan man implementere bruken av batterier på resten av gården, slik at kostnadene ved å ha mange batteripakker reduseres?

En annen spennende videreføring av denne oppgaven kan være å gå dypere inn i oppbyggingen av traktoren, for å se hvilke andre måter man kan øke virkningsgraden til traktoren. Forslag til hva som kan undersøkes er innføring av belter istedenfor traktorhjul, gå dypere inn på bruken av navmotorer og se på bruken av egne batteripakker i redskapene til traktoren. Hvis en slik analyse kan føre til en videre økning av virkningsgraden til den elektriske traktoren, kan det bety at den batteridrevne traktoren kan settes i drift med teknologien vi har i dag.

Det er ikke fokusert på den økonomiske siden av systemene det er sett på i denne oppgaven. Det kunne derfor vært spennende å undersøke hvordan den økonomiske levedyktigheten til systemene er. Selv om PV-modulene, batteripakkene, brenselcellen, elektrolyseren og hydrogentankene er dyre komponenter, kan det tenkes at man ved å produsere den elektriske energien på stedet kan spare penger i forhold til dagens forbruk av både strøm og diesel. Kan det være lønnsomt å drifte det norske jordbruket på denne måten i dag? Er det lønnsomt i fremtiden?

8 Konklusjon

Det er vist at det i alle områdene det er sett på i denne oppgaven (Balsfjord, Verdal, Sola og Ås) kan driftes mellomstore til store jorder ved bruk av en elektrisk traktor med den elektriske energien som produseres ved PV-anlegget på låvetaket. En oversikt over hvor store jorder som kan driftes ved ulike løsninger er gitt i tabell 41. Med unntak verdiene for den månedlige energibalansen i Verdal, er det største jordbruksarealet for PV-anlegget med moduler vendt mot øst-/vest og det minste jordbruksarealet med moduler vendt mot sør. Jordbruksarealene som kan driftes av de elektriske traktorene er størst ved PV-anlegg med øst-/vestvendte moduler fordi modularealet er dobbelt så stort som ved sørvendte moduler, og produksjonen av elektrisk energi derfor er større.

Tabell 41: Oversikt over jordbruksarealene som kan driftes i de ulike områdene med de to elektriske traktorene med energien fra PV-anlegget på låvetaket. Årlig betyr at det er gjort en årlig energibalanse mellom forbruk og produksjon av elektrisk energi/hydrogen, og månedlig betyr at det er gjort en månedlig energibalanse.

Plassering av jordbruk	Areal batteridrevet traktor (årlig)	Areal batteridrevet traktor (månedlig)	Areal hydrogentraktor (årlig)
Balsfjord	540 – 900 daa	130 – 140 daa	74 – 120 daa
Verdal	3000 – 4700 daa	270 – 400 daa	420 – 660 daa
Sola	500 – 840 daa	230 – 270 daa	70 – 120 daa
Ås	3400 – 5600 daa	1000 – 1200 daa	480 – 780 daa

Det gjennomsnittlige gårdsbruket i Norge hadde i 2014 et jordbruksareal på 230 daa. Sammenlignet med det gjennomsnittlige jordbruksarealet, samt oversikten over jordbruksarealer i Norge i tabellen gitt i vedlegg 6, er det vist at de aller fleste jordbruk kan driftes ved hjelp av hydrogentraktoren eller batteritraktoren i alle de fire områdene det er sett på i denne oppgaven. Det vil være et overskudd av elektrisk energi fra PV-anlegget ved de fleste gårdsbruk, og energien er foreslått brukt til andre formål ved gården, peak-shaving ved gården eller at modularealet til PV-anlegget reduseres.

Det er vist at elektrifisering øker virkningsgraden til traktoren, og at denne økningen er størst for den batteridrevne traktoren. Sett fra et energistandpunkt er dette interessant, da det kan lagres mindre energi i traktoren for å utføre det samme arbeidet. Bruk av fire navmotorer istedenfor en sentral elektrisk motor vil kunne redusere energibehovet til traktoren ved pløying, og det kan derfor være nyttig å endre traktorens oppbygging om man velger å elektrifisere den.

Med teknologien som finnes på markedet i dag er ikke de to elektrifiserte traktorene gjennomførbare dersom de skal erstatte dieseltraktoren. Det er imidlertid være mulig å bruke den batteridrevne traktoren som traktor nummer to med teknologien som er på markedet i dag. Det er behov for bedre batteripakker før batteritraktoren kan brukes til det tyngste jordbruksarbeidet, som for eksempel pløying av jordene. For hydrogentraktoren er hydrogentankene problemet. De kan kun lagre små mengder hydrogen, og blir fort tunge og store. Selv ved lette jordbruksprosesser blir det nødvendig med flere påfyllinger av tanken i løpet av en dag, noe som gjør den mindre egnet i jordbrukssammenheng. Det konkluderes med at dersom det gjøres fremskritt innen batteri- og hydrogenteknologi i fremtiden vil traktorene være praktiske i bruk, og at det er mest nærliggende at dette vil skje med den batteridrevne traktoren. Kapasiteten på nettet inn til gården kan også være et problem for den batteridrevne traktoren, og kostnadene ved utbyggingen av nettet bør derfor undersøkes før man eventuelt implementerer bruken av traktoren. Et alternativ til dette er bruken av større stasjonære batteripakker på gården, hvor energien lagret i batteripakken kan brukes til bl.a. oppladning av batteripakkene til traktoren.

Well- to-wheel virkningsgradene til de ulike systemene er som listet opp i tabell 42.

Tabell 42: Sammenligning av de ulike systemenes WTW-virkningsgrader.

System:	Dieseltraktor	PV – El. traktor	PV - Hydrogentraktor	Nett – El. traktor
Med kraftuttak	0,23	0,06	0,02	0,60
Uten kraftuttak	0,14	0,04	0,01	0,37

Det at traktoren i seg selv har en høyere virkningsgrad når redskapene til traktoren bruker kraftuttaket, har innvirkning på systemenes virkningsgrad. PV-anlegget som helhet har en relativt lav virkningsgrad, hvor virkningsgraden for ytre påvirkninger på den innstrålte energien også er medregnet. Den lave virkningsgraden fører til at de minst effektive systemene er de med de elektriske traktorene som får energi fra PV-anlegget. Systemet med best virkningsgrad er den batteridrevne traktoren som lades fra nett.

Referanseliste

1. Hojem, J. F. & Ohna, I. (2010). Utslipp av klimagasser fra norsk jordbruk og tiltak for å redusere dem. *Zero - rapport*. Oslo: Zero. 36 s.
2. *Simple Carbon Calculator*. (2001-2014). Tilgjengelig fra: <http://www.carbon-calculator.org.uk/> (lest 13.04.2015).
3. Bye, A. S., Aarstad, P. A. & fler, m. (2013). *Jordbruk og miljø - Tilstand og utvikling 2013*. 138 s.
4. Haugstad, T. (2008). *Mer enn bare bensin og diesel*: Teknisk Ukeblad Media AS. Tilgjengelig fra: <http://energilink.tu.no/no/drivstoff.aspx> (lest 03.02.2015).
5. *Energibruk per husholdning, totalt og per m2 boligareal. 2 siste år. kWh*. (2012). Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/187677/energibruk-per-husholdning-totalt-og-per-m2-boligareal.2-siste-%C3%A5r.kwh> (lest 28.04.2015).
6. Eriksen, J. (2015). *Møte med Jon Eriksen ved HYSTORSYS*. Kjeller (17.03.2015).
7. Kviste, H. H. (2014). *Elbilen er sjefen*: Ladestasjoner AS. Tilgjengelig fra: <http://www.ladestasjoner.no/hurtiglading/om-hurtiglading/63-elbilen-er-sjefen> (lest 05.02.2015).
8. Mak, H.-Y., Rong, Y. & Shen, Z.-J. M. (2011). *Infrastructure Planning for Electric Vehicles with Battery Swapping*. Kina. 32 s.
9. Kershner, I. (2013). *Israeli Venture Meant to Serve Electric Cars Is Ending Its Run*. New York: The New York Times. Tilgjengelig fra: http://www.nytimes.com/2013/05/27/business/global/israeli-electric-car-company-files-for-liquidation.html?nl=todaysheadlines&emc=edit_th_20130527&r=1& (lest 05.02.2015).
10. *Better Place Battery Swap Demonstration*. (2009). EV World's 'Future In Motion' Video. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=qd0WPw3p2MQ> (lest 05.02.2015).
11. LeBeau, p. (2014). *No time to charge? Tesla launches battery-swap station*: CNBC. Tilgjengelig fra: <http://www.cnn.com/id/102284656> (lest 05.02.2015).
12. *Battery Swap Event - Full charge in 90 seconds*. (2013). Tilgjengelig fra: <http://www.teslamotors.com/videos/battery-swap-event> (lest 05.02.2015).
13. Goossens, E. (2015). *Gogoro Unveiling Electric Scooter With Battery-Swapping Service*: Bloomberg Business. Tilgjengelig fra: <http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-01-05/gogoro-unveiling-electric-scooter-with-battery-swapping-service> (lest 05.02.2015).
14. *Set out for a journey with GreenWay!* Tilgjengelig fra: <http://www.greenway.sk/en/content/parallax> (lest 05.02.2015).
15. Moore, B. (2013). *Tesla Just Made Every Other Electric Car Obsolete*. Tilgjengelig fra: <http://evworld.com/focus.cfm?cid=155> (lest 05.02.2015).
16. Heckerth, S. (2009). *Electric Tractors*. Tilgjengelig fra: <http://www.renewables.com/Permaculture/ElectricTractor.htm> (lest 17.02.2015).
17. *Videos*. (2014). Electric Tractor corp. Tilgjengelig fra: <http://electrictractor.com/video/> (lest 17.02.2015).
18. *Fendt X Concept*. (2015). Fendt, AGCO Corporation. Tilgjengelig fra: <http://www.fendt.com/us/2466.asp> (lest 17.02.2015).
19. *Fendt X Concept*. (2013). FendtTV. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=xGI7bTaOMpY> (lest 17.02.2015).
20. Pichlmaier, B., Breu, W. & Sxajek, A. (2014). *Elektrifizierung bei Traktoren*, utdrag. 6.
21. inc., V. (2011). *The Valtra Ants Concept, Celebrating the next sixty years*. Suolahti, Finland: Valtra Inc. 13 s.
22. *Valtra ANTS concept*. (2011). ValtraOy. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=EOFNjKUObOgg> (lest 20.02.2015).
23. Communications, N. H. B. (2009). *New Holland NH² Hydrogen Powered Tractor*. Italia. 2 s.

24. *NH²™ Hydrogen Powered Tractor and Energy Independent Farm*. New Holland Agriculture. Tilgjengelig fra: <http://www.newholland.co.nz/?id=155> (lest 17.02.2015).
25. *Peak Oil, Food Security and Amptac the Electric Tractor*. (2012). Amptac. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=LuzBzfo7dzs> (lest 20.02.2015).
26. *About Us*. Postcode Lottery Green Challenge. Tilgjengelig fra: <http://www.greenchallenge.info/index.php/competition/about-us> (lest 20.02.2015).
27. Tidswell, M. (2015). *Regarding your film: Peak Oil, Food Security, and Amptac the Electric Tractor* (E-post fra animasjonsprodusenten Mark Tidswell 19.02.2015).
28. Grimstad, L. (2014). *Powertrain, steering and control components fir the NMBU Agricultural Mobile Pobotic Platform*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 96 s.
29. Bøe, J. K. (2015). *Møte med Jan Kåre Bøe ved NMBU*. Oslo (13.03.2015).
30. Torgersen, J. (2014). *Mobile Agricultural Robot: Independent Four Wheel Ackerman Steering*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 124 s.
31. Blomberg, F. (2014). *Rammekonstruksjon for autonom landbruksmaskin*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 107 s.
32. Meltzer, F. (2014). *Fremdrift og energiforbruk for autonom landbruksrobot*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 72 s.
33. Bøe, J. K. (2000). *Traktorer og basismaskiner, kurskompendium*. 1 utg. Ås: Norges landbukshøyskole. 414 s.
34. *Sign, black, symbol, equipment, tractor, far*. (2015). pd4pic. Tilgjengelig fra: <http://www.pd4pic.com/sign-black-symbol-equipment-tractor-far.html> (lest 03.02.2015).
35. Thorud, B., Nordahl, S. H., Bugge, L., Authen, M. L. & Bernhard, P. (2012). *Solstrøm i Norge*. 41 s.
36. Challenge, M. (1997). *Determining Electric Motor Load and Efficiency*: U.S Department of Energy. 16 s.
37. *Premium-Efficiency Motors*. (2013). Office of Energy Efficiency, Natural Resources Canada. Tilgjengelig fra: <http://www.nrcan.gc.ca/energy/publications/efficiency/buildings/5947> (lest 16.02.2015).
38. Widerström, g. (2010). *Om klassifisering och märkning av elmotorer*: Energimyndigheten Sverige. Tilgjengelig fra: <http://www.energimyndigheten.se/Foretag/Energieffektivisering-i-foretag/Tillverkningsindustri---hjalpsystem-och-processer/Elmotorer/Energimyndighetens-lista-over-hogeffektiva-elmotorer/> (lest 16.02.2015).
39. Pichlmaier, B. (2015). *Master thesis about electrical tractors* (E-post fra ingeniør Benno Pichlmaier ved Fendt 27.02.2015).
40. *Elmotorer*. (2015). Energimyndigheten Sverige. Tilgjengelig fra: <https://www.energimyndigheten.se/Foretag/Energieffektivisering-i-foretag/Tillverkningsindustri---hjalpsystem-och-processer/Elmotorer/> (lest 07.05.2015).
41. Dell, R. M., Rand, D. A. J. & Royal Society of, C. (2001). *Understanding batteries*. RSC paperbacks. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
42. Anderman, M. (2014). *The Tesla Battery Report: Tesla Motors: Battery Technology, Analysis of the Gigafactory, and the Automakers' Perspectives: Advanced Automotive Batteries*. 39 s.
43. Sun, J. (2010). *Car Battery Efficiencies*. California: Stanford University. Tilgjengelig fra: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/sun1/> (lest 12.03.2015).
44. Harrop, P. (2011). *In-Wheel Motors for Electric Vehicles Gaining Market Acceptance*: EV World. Tilgjengelig fra: <http://evworld.com/news.cfm?newsid=25224> (lest 08.05.2015).
45. Larminie, J. & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained*. 2 utg. Chichester: Wiley. 406 s.
46. *Fuel Cell Electric Vehicles*. (2014). Tilgjengelig fra: http://www.afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html (lest 13.03.2015).

47. *Fuel Cell Principle*. (2011). Nedstack. Tilgjengelig fra: <http://www.nedstack.com/technology/fuel-cell-principle> (lest 15.03.2015).
48. Hua, T. Q., Ahluwalia, R. K., Peng, J. K. & fler, m. (2010). Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications. Argonne, Illinois: Nuclear Engineering Division, Argonne National Laboratory. 81 s.
49. Tzimas, E., Filiou, C. & fler, m. (2003). Hydrogen storage: State-of-the-art and future perspective. Nederland. 97 s.
50. Mori, D., Haraikawa, N., Kobayashi, N. & fler, m. (2005). High-pressure Metal Hydride Tank for Fuel Cell Vehicles. Luca, Italia: Toyota Motor Corporation. 18 s.
51. Johnsen, S. (2015). *Spørsmål til masteroppgave* (E-post fra bygningsplanlegger Svein Johnsen ved Landbruk Nord 02.03.2015).
52. Granum, C. M. (2014). *PV systemer i distribusjonsnettet*. Masteroppgave. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for elkraftteknikk. 127 s.
53. Berner, M. (2013). *Kostnadstudie, Solkraft i Norge 2013*: Enova SF. 36 s.
54. *Meteorologiske data for Ås*. (2014). Ås: NMBU. Tilgjengelig fra: <http://www.nmbu.no/om/fakulteter/miljotek/institutter/imt/laboratorier/fagklim/meteorologiske-data> (lest 23.03.2015).
55. Chen, C. J. (2011). *Physics of Solar Energy*. 1 utg. Hoboken, NJ, USA: Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
56. Vie, P. & Kirkengen, M. (2015). *Møte med Martin Kirkengen og Preben Vie ved IFE*. Kjeller (11.03.2015).
57. Ivy, J. (2004). Summary of Electrolytic Hydrogen Production. USA: National Renewable Energy Laboratory. 27 s.
58. Bremdal, B. (2015). *Telefonsamtale med Bernt Bremdal ved NCE Smart Energy Markets* (Telefonsamtale med Bernt Bremdal ved NCE Smart Energy Markets 04.05.2015).
59. Berlijn, S. (2014). *Elektriske kraftsystemer og anlegg*. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (Forelesning 20.11.2014).
60. Korsæth, A. (2015). *Bakgrunnsstoff til masteroppgave* (E-post fra forskningssjef Audun Korsæth ved Bioforsk Apelsvoll 13.01.2015).
61. Henriksen, T. M. & Korsæth, A. (2013). Inventory of Norwegian grain production: Data from three average- and three high yielding cereal farms located in the major grain producing areas of Norway. Apelsvoll: Bioforsk Landbruk. 52 s.
62. Foss, S. E. (2015). *Masteroppgaven* (E-post fra Sean Erik Foss, avdelingssjef ved solenergiavdelingen ved IFE 05.04.2015).
63. Byrjedal, Ø., Løvholm, A. L. & Liléo, S. (2013). Resource mapping of solar energy: Kjeller Vindteknikk. 55 s.
64. Hagen, L. (2011). *Measured, Modelled and Satellite Derived Solar Radiation in Scandinavia*. Masteroppgave. Bergen: Universitetet i Bergen, Geofysisk institutt. 91 s.
65. Mermound, A. & Wittmer, B. (2014). *PVsyst User Manual*. Sveits. 102 s.
66. landbruksforvaltning, S. (2014). *PT-912 Antall dekar og søkere med de ulike vekstgruppene 31.7. 2014*. Tilgjengelig fra: <http://statistikk.landbruksdirektoratet.no/skf/PT912/141510/PT912F19.HTM> (lest 06.04.2015).
67. Heim, A. (2014). *Spørsmålark til masteroppgave* (E-post fra bonde Arild Heim 26.03.2015).
68. Buan, B. (2015). *Spørsmål i forbindelse med masteroppgave* (E-post fra Brita Buan, rådgiver ved Nord-Trøndelag Bondelag 24.03.2015).
69. Røstad, H. A. (2015). *Spørsmålsark til masteroppgave* (E-post fra bonde Håvard A. Røstad 01.04.2015).
70. Braaten, A. H. (2015). *Lite spørsmål i forbindelse med min masteroppgave* (E-post fra Are H. Braaten, førstekonsulent ved Rogaland Bondelag 24.03.2015).
71. Røyneberg, A. (2015). *Spørreskjema masteroppgave* (E-post fra bonde Arnstein Røyneberg 15.04.2015).

72. landbruksforvaltning, S. (2015). *PT-912 Antall dekar og søkere med de ulike vekstgruppene 31.7. 2014*. Tilgjengelig fra: <http://statistikk.landbruksdirektoratet.no/skf/PT912/141510/PT912F02.HTM> (lest 06.04.2015).
73. Wetlesen, A. (2015). *Spørsmålsark til masteroppgave* (E-post fra bonde Anders Wetlesen 16.04.2015).
74. *Jordbruksareal per jordbruksbedrift, etter fylke*. (2015). Tilgjengelig fra: <http://www.ssb.no/208056/jordbruksareal-per-jordbruksbedrift-etter-fylke> (lest 22.04.15).
75. *Strukturen i jordbruket, Tabell: 03313: Jordbruksbedrifter, etter jordbruksareal i drift (F)*. (2015). Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/statistikkbanken/selectvarval/define.asp?SubjectCode=01&ProductId=01&MainTable=Driftseiningar2&contents=Driftseiningar&PLanguage=0&Qid=0&nvl=True&mt=1&pm=&SessID=4683409&FokusertBoks=1&gruppe1=Hele&gruppe2=Hele&gruppe3=Hele&VS1=FylkerJordbruk&VS2=Arealet2&VS3=&CMSSubjectArea=jord-skog-jakt-og-fiskeri&KortNavnWeb=stjord&StatVariant=&Tabstrip=SELECT&aggresetnr=1&checked=true> (lest 22.04.2015).
76. Corporation, G. M. (2001). Well - to - Tank Energy Use and Greenhouse Emissions og Transportation Fuels. 84 s.
77. *Vannkraft*. (2012). UngEnergi. Tilgjengelig fra: <http://ungenergi.no/fornybar-energi/vannkraft-2/> (lest 08.04.2015).
78. Skaansar, E., Lytskjold, B. & fler, m. (2011). Energistatus. 83 s.
79. Langeland, Å. (2015). *Spørsmål til masteroppgave* (E-post fra Åsmund Langeland, rådgiver ved Hedmark Landbruksrådgivning 09.02.2015).

Vedlegg

Vedlegg 1: Forklaring på formelen for utregning av virkningsgraden til traktorhjulene

Fra figur 5 for virkningsgraden for overføring av effekt fra hjulene til bakken, kan det sees at virkningsgraden er gitt som:

$$\eta = \frac{\kappa(1-i)}{\kappa+\rho} \quad (v1)$$

Koeffisientene κ , i og ρ er definert under.

Hjulgrepet er hvor godt et hjul overfører trekkraften til underlaget, og kan beskrives ved hjelp av formelen:

$$F_T = \kappa \cdot F_w \quad (v2)$$

Hvor F_T er trekkraften overført fra hjul til underlag, κ er hjulgrepskoeffisienten og F_w er aksellasten.

Hjulgrepskoeffisienten har en verdi mellom 0 og 1.

En andel av effekten som brukes av dekket går til å overvinne rullemotstanden. Den kraftkomponenten som får med på å overgå rullemotstanden kan beskrives ved hjelp av:

$$F_R = \rho \cdot F_w \quad (v3)$$

Hvor F_R er kraften som trengs for å overgå rullemotstanden, ρ er rullemotstandskoeffisienten og F_w er aksellasten.

Rullemotstandskoeffisienten har en verdi mellom 0 og 1.

Når kraften fra hjulet på underlaget blir for stor, vil ikke all energien kunne overføres til trekkenergi. Dette gjør at traktoren vil begynne å slure, og hastigheten til traktoren blir redusert i forhold til det man ideelt skulle hatt om alle energien hadde blitt overført. Det blir derfor en forskjell i periferihastigheten til dekket og hastigheten til traktoren. Definisjonen på sluring blir derfor gitt som:

$$i = \frac{V_1 - V_0}{V_1} \quad (v4)$$

Hvor i er sluringen, V_1 er periferihastigheten og V_0 er hastigheten til traktoren.

Sluringen har en verdi mellom 0 og 1.

Vedlegg 2: Tabeller for drivstofforbruk

Tabellene for drivstofforbruket er hentet fra Bioforsk Landbruks sine undersøkelser, og er hentet fra kilde ⁶¹. Tallene gjelder for seks ulike kornlandbruk rundt om i Norge, og er enten regnet ut eller levert rett fra gårdseier. Nedenfor er tabellene for drivstofforbruket på de ulike gårdene, samt en kortfattet informasjon om de ulike gårdene.

Gård 1 og 2:

Gård 1 og 2 er en middels stor (Table 6) og en stor (Table 10) gård i Stangeområdet langs Mjøsa. På gård 1 er det fem jorder med totalt 30,5 ha i drift, hvor det dyrkes tre forskjellige typer korn. Gården har tre traktorer i drift: en på 45 kW, en på 60 kW og en på 90 kW. På gård 2 er det fire jorder med totalt 88,7 ha i drift, hvor det dyrkes to forskjellige typer korn, en type oljeplante og løk. Gården har to traktorer i drift: en på 70 kW og en på 135 kW.

Table 6. Labour and diesel requirement needed on Farm 1.

Process	Tractor (kW)	Workload (ltr h ⁻¹ kW ⁻¹)	Labour (h ha ⁻¹)	Diesel (ltr ha ⁻¹)
Chemical fallow ¹	60	0.12	0.74	2.0
Ploughing	90	0.19	1.24	21.2
Levelling	90	0.19	0.45	7.7
Stone picking	90	0.19	0.2 ²	2.2
Liming ³	120	0.19	0.29	6.6
Sowing and fertilization	90	0.12	0.78	8.4
Split fertilization	60	0.12	0.23	1.7
Spraying ⁴	60	0.12	0.28	2.0
Drumming	45	0.12	0.44	2.4
Treshing barley	95	0.19	0.90	16.2
Treshing s. wheat	95	0.19	1.03	18.6
Treshing oats	95	0.19	1.13 ²	20.5

¹Per spraying every 3rd year, ²value set, ³every 8th year ⁴per spraying.

Table 10. Labour and diesel requirement needed for the field work processes on Farm 2 in Stange.

Process	Tractor (kW)	Workload (ltr h ⁻¹ kW ⁻¹)	Labour (h ha ⁻¹)	Diesel (ltr ha ⁻¹)
Chemical fallow ¹	70	0.12	0.24	2.0
Ploughing	135	0.19	0.94	24.1
Levelling	135	0.19	0.34	8.7
Stone picking	135	0.12	0.16 ²	2.6
Liming ³	140	0.12	0.13	2.2
Sowing and fertilization	135	0.12	0.6	9.7
Split fertilization	70	0.15	0.12	1.3
Spraying ⁴	70	0.12	0.24	2.0
Drumming	70	0.12	0.29	2.4
Treshing barley				14.0 ⁵
Treshing s. wheat				14.5 ⁵
Treshing w. wheat				20.0 ⁵

¹Every 3rd year, ²Value calculated, ³Every 6th year, ⁴per spraying, ⁵Set similar to Farm 4.

Gård 3 og 4:

Gård 3 og 4 er en middels stor (Table 14) og en stor (Table 18) gård i det østlige området av Oslofjorden. Gård 1 har fem jorder med totalt 32,4 ha i drift, hvor det dyrkes tre forskjellige typer korn. Gården har tre traktorer i drift: en på 45 kW, en på 60 kW og en på 90 kW. Gård 2 har 26 jorder med totalt 237 ha i drift, hvor det dyrkes to forskjellige typer korn, en type oljeplanter og en type bønner. Gården har tre traktorer i drift: en på 81 kW, en på 110 kW og en på 118 kW. Traktorene brukes om, og det er i rapporten derfor brukt en traktorstørrelse på 114 kW til utregningene.

Table 14. Labour and diesel requirement needed for the field work on Farm 3.

Process	Tractor (kW)	Workload (ltr h ⁻¹ kW ⁻¹)	Labour (hr h ⁻¹)	Diesel (ltr h ⁻¹)
Chemical fallow ¹	60	0.12	0.74	2.0
Ploughing	90	0.19	1.24	24.8
Levelling	90	0.19	0.45	7.7
Stone picking	90	0.19	0.2 ²	2.2
Harrowing	90	0.19	0.41	7.0
Liming ³	120	0.19	0.29	6.6
Sowing and fertilization	60	0.12	0.78	5.6
Split fertilization ⁴	60	0.12	0.23	1.7
Spraying ⁵	60	0.12	0.28	2.0
Drumming	45	0.12	0.44	2.4
Treshing barley	95	0.19	0.82	14.8
Treshing oats	95	0.19	0.88	15.9
Treshing s. wheat	95	0.19	0.79	14.3
Treshing w. wheat	95	0.19	1.00	18.1

¹Every 3rd year, ²Value set, ³Every 8th year, ⁴per ha split fertilized, ⁵per spraying.

Table 18. Labour and diesel requirement needed for the field work processes on Farm 4.

Process	Tractor (kW)	Workload (ltr h ⁻¹ kW ⁻¹)	Labour (h ha ⁻¹)	Diesel (ltr ha ⁻¹)
Chemical fallow	114	0.12	0.15	2.0
Autumn harrowing	114	0.19	0.21	4.5
Spring harrowing	114	0.19	0.21	4.5
Liming ²	140	0.12	0.13	2.2
Sowing and fertilization	114		0.40	7.5 ³
Split fertilization	114	0.15	0.12	1.3
Spraying ⁴	114	0.12	0.15	2.0
Drumming	114	0.12	0.20	2.7
Treshing Barley				14 ⁵
Treshing Spring wheat				14.5 ⁵
Treshing Winter wheat				20.0 ⁵

¹Value set, ²Every 6th year, ³set in accordance with farmers estimate ⁴per spraying, ⁵assumed.

Gård 5 og 6:

Den femte gården er en middels stor (Table 22) og en stor (Table 26) gård langs Trondheimsfjorden. Gård 1 har fem jorder med totalt 28,3 ha i drift, hvor det dyrkes to forskjellige typer korn. Gården har tre traktorer i drift: en på 45 kW, en på 60 kW og en på 90 kW. Gård 2 har 22 jorder med totalt 98 ha i drift, hvor det dyrkes tre forskjellige typer korn. Gården har tre traktorer i drift: en på 70 kW og to på 110 kW. Traktorene brukes litt om hverandre, og det er derfor brukt en 90 kW traktor til utregningene.

Table 22. Labour and diesel requirement needed for the field work processes on Farm 5.

Process	Tractor (kW)	Workload (ltr h ⁻¹ kW ⁻¹)	Labour (h ha ⁻¹)	Diesel (ltr ha ⁻¹)
Chemical fallow ¹	60	0.12	0.74	2.0
Ploughing	90	0.25	1.24	27.9
Levelling	90	0.19	0.45	7.7
Stone picking	90	0.19	0.2 ²	2.2
Harrowing	90	0.19	0.41	7.0
Liming ³	120	0.19	0.29	6.6
Sowing and fertilization, barley	90	0.12	0.90	6.5
Sowing, wheat	60	0.12	0.76	5.5
Spring fertilization	60	0.12	0.30	2.2
Split fertilization	60	0.12	0.23	1.7
Spraying ⁴	60	0.12	0.28	2.0
Drumming	45	0.12	0.44	2.4
Treshing, barley	95	0.19	0.72	13.0
Treshing, w. wheat	95	0.19	0.87	15.7

¹Every 3rd year, ²value set, ³every 8th year, ⁴per spraying

Table 26. Labour and diesel requirement needed for the field work processes on Farm 6.

Process	Tractor (kW)	Workload (ltr h ⁻¹ kW ⁻¹)	Labour (h ha ⁻¹)	Diesel (ltr ha ⁻¹)
Chemical fallow ¹	90	0.12	0.26	2.8
Ploughing	90	0.19	1.735	29.7
Spring harrowing	110	0.19	0.39	8.2
Liming ²	140	0.12	0.13	2.2
Sowing and fertilization	90	0.12	0.90	9.7
Split fertilization	90	0.12	0.34	3.7
Spraying ³	90	0.12	0.26	2.8
Treshing barley	110	0.19	1.15	24
Treshing oat ⁴	110	0.19	1.19	24.9
Treshing w. wheat	110	0.19	1.19	24.9

¹on 20% of the farm annually, ²Made by contractor every 10th year, ³per spraying, ⁴assumed equal with winter wheat.

Vedlegg 3: Verdier for tap i PV-anlegget på grunn av snø på modulene

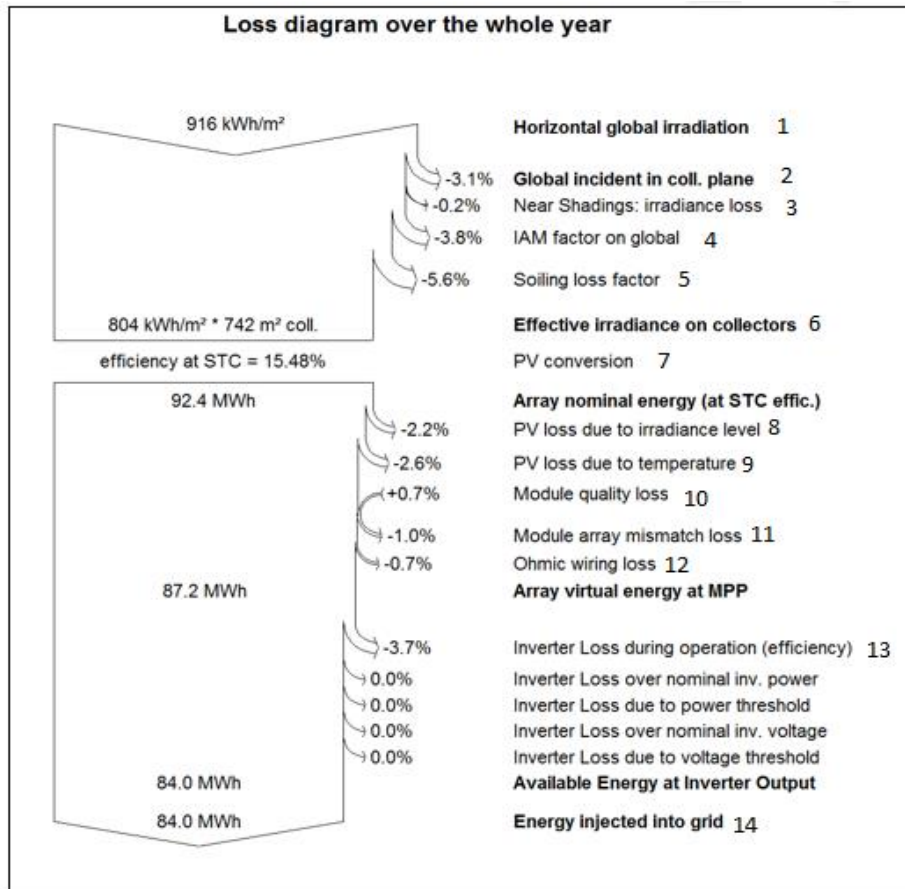
Multiconsult har hentet erfaring fra sine PV-anlegg, og har ut fra dette satt opp denne tabellen for tapsverdier på grunn av snølag:

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
Oslo	70 %	70 %	40 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	50 %
Kristiansand	60 %	60 %	30 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	40 %
Bergen	70 %	70 %	40 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	50 %
Trondheim	80 %	80 %	50 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	50 %
Tromsø	90 %	90 %	60 %	20 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	60 %

Tabellen er hentet fra kilde ⁵³, og viser prosentandelen av modularealet som er dekket av snø.

Vedlegg 4: Tapoversikt fra PVsyst for PV-anlegg i Ås.

Fra det øst-/vestvendte anlegget i Ås ble tapoversikten som følgende:



Forklaring av tapene:

- 1) Innstråling på en horisontal flate
- 2) Tillegg i innstrålt energi fordi modulene er vinklet mot solen.
- 3) Tap på grunn av nærliggende skyggelegging. I hoved-simuleringene kommer dette i hovedsak av at taket kommer i veien for solen når solen står lavt på himmelen, og at solen er på andre siden av taket ved øst-/vestvendte moduler.
- 4) Tap på grunn av reflektert stråling fra PV-modulene.
- 5) Tap på grunn av snølag og skitt på modulene. I simuleringene gjort i denne oppgaven er det kun tatt hensyn til snølag.
- 6) Den effektive innstrålte energien på modulene.
- 7) Virkningsgraden til PV-modulene.
- 8) Tap på grunn av bølgelengder som ikke blir absorbert av modulene.
- 9) Tap på grunn av at temperaturen blir over 25 °C, og modulene da får en redusert virkningsgrad.
- 10) «Kvalitetstap».
- 11) Tap på grunn av at modulene har forskjellige elektriske egenskaper, og derfor ikke vil gi helt lik elektrisk ytelse.
- 12) Tap på grunn av ohmske motstander i elektriske ledere.
- 13) Tap i vekselretteren.
- 14) Elektrisk energi levert til forbruker i løpet av et år.

Vedlegg 5: Tabeller for tidsbruk og perioder for de ulike jordbruksprosessene

Balsfjord:

Prosess	Antall timer totalt	Måned
Pløying	15	Juni
Steinplukking	6	Juni
Harving	2	Juni
Såing og gjødsling	160	Juni/august
Tromling	1	Juni
Antall dekar	300	
Plantetyper:	Gress, (timotei, engsvingel)	

Hentet fra kilde ⁶⁷

Verdal:

Prosess	Antall timer totalt	Måned
Pløying	200	April/mai, oktober/november
Slodding	20	April/mai
Steinplukking	20	Mai
Harving	100	April/mai
Såing og gjødsling	100	April/mai
Delgjødsling	20	Juni
Sprøyting	100	Juni/juli, august/september
Tromling	25	April/mai
Antall dekar	1700	
Plantetyper:	Korn, bygg	

Hentet fra kilde ⁶⁹

Sola:

Prosess	Antall timer totalt	Måned
Kjemisk brakking	4	Oktober
Pløying	40	April
Slodding	15	April
Steinplukking	20	April
Harving	5	April
Kalking	5	Februar
Såing og gjødsling	300	Mars/april
Delgjødsling	500	Juni/juli/august
Sprøyting	10	April/mai
Tromling	7	April/mai
Gresshøsting	1000	Mai/juni/juli/august/september/oktober
Antall dekar	1100	
Plantetyper:	Gress	

Hentet fra kilde ⁷¹

Ås:

Prosess	Antall timer totalt	Måned
Pløying	150	August/september/oktober
Steinplukking	70	April/mai, august/september
Harving	500	April/mai, august/september/oktober
Såing og gjødsling	200	April/mai, august/september
Delgjødsling	30	April/mai/juni
Sprøyting	200	April/mai/juni/juli/august/september/oktober
Tromling	100	April/mai, august/september
Antall dekar	2900	
Plantetyper:	Korn, raps, åkebønner	

Hentet fra kilde ⁷³

Vedlegg 6: Jordbruksarealer

Størrelse	< 49	50-99	100-199	200-299	300-499	> 500	Totalt	Gjennomsnittlig
Fylke	daa	daa	daa	daa	Daa	daa	daa	jordbruksareal
Østfold	213	261	550	412	416	419	2271	321,1
Akershus og Oslo	209	272	507	337	410	474	2209	350,3
Hedmark	358	463	786	559	638	592	3396	307,7
Oppland	532	856	1500	918	665	306	4777	209
Buskerud	287	458	667	358	281	225	2276	223,2
Vestfold	220	245	398	209	206	214	1492	273,9
Telemark	273	433	402	144	131	88	1471	166,3
Aust - Agder	172	142	187	87	81	28	697	159,9
Vest - Agder	242	242	288	151	137	47	1107	165,9
Rogaland	713	598	1159	823	768	383	4444	224,6
Hordaland	812	875	841	354	192	58	3132	127,6
Sogn og Fjordane	550	768	1012	468	195	41	3034	141,4
Møre og Romsdal	371	525	780	561	407	129	2773	194,4
Sør - Trøndelag	265	417	854	597	530	301	2964	248,4
Nord-Trøndelag	325	362	812	673	704	381	3257	266
Nordland	227	295	585	486	466	215	2274	245,2
Troms	83	134	268	207	195	88	975	242
Finnmark	40	35	75	54	67	56	327	289,2
Hele Landet	5892	7381	11671	7398	6489	4045	42876	230

Hentet fra ⁷⁴ og ⁷⁵, gjennomsnittlig jordbruksareal er oppgitt i dekar.



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no