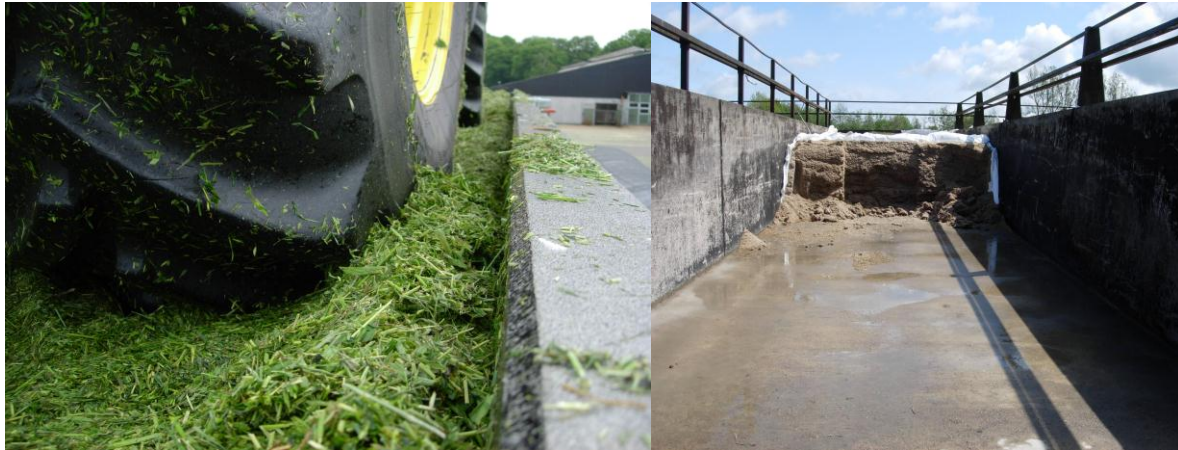


2012-01-25

SLF slutrapport



Beräkningsunderlag för hållfasthetsdimensionering av väggar till plansilor för ensilage - pressvattennivåer

Design criteria for structural design of silage silo walls – silage juice levels

Hans von Wachenfelt & Christer Nilsson

Lantbrukets byggnadsteknik

Sveriges Lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsplanering, trädgård- och jordbruksvetenskap

Finansiering

Studien har finansierats av Stiftelsen Lantbruksforskning (V1130025) tillsammans med Alnarps Partnerskap (456) och SLO - fonden (V10-0050-SLO).

1.1 Bakgrund

Intresset bland lantbrukare för en ökad andel närproducerat foder blir större och större. Närproducerat foder kan också minska transportbehovet och därmed klimatbelastningen. En stor del av det grovfoder som används i nötkreatursbesättningar lagras i plansilor i form av ensilage baserat på vall eller fodermajs. En typisk plansilo består av en bottenplatta av betong med väggar av platsgjuten betong eller betongelement – eventuellt av trä. Vägghöjden har traditionellt varit 2- 3 meter. Under senare år har det blivit mer och mer vanligt att bygga plansilor där väggen är 4 meter. Trenden är att göra den ännu högre. Investeringarna i plansilor inom det svenska jordbruket har mer än fördubblats den senaste 10-årsperioden.

För närvarande finns det inga gällande svenska anvisningar för dimensionering av väggarna i plansilor för ensilage. Dimensioneringen görs med ledning av tidigare utfärdade regler. Dessa var framtagna att tillämpas för silor med väggar upp till ca 3 m. Mycket tyder

på att anvisningarna för större vägghöjd överskattar lasterna, främst av pressvattentryck, resulterande i överdimensionering, materialslöseri och ökade investeringskostnader.

Mer data borde samlas in i t.ex. fältundersökningar för att bestämma ensilagets fysikaliska egenskaper och andra faktorer av betydelse för maximalt förekommande pressvattennivå och horisontaltryckets storlek. Dessa grunddata bör kunna ligga som underlag vid framtagandet av nya nationella dimensioneringsanvisningar och ny svensk standard. Det övergripande målet med ett sådant arbete är att minska lantbrukarnas investeringskostnader för ensilageplansilor.

1.2 Problemställning

Väggarna dimensioneras hållfasthetsmässigt huvudsakligen med hänsyn till de horisontalkrafter som uppkommer från ensilaget i samband med inläggning och förvaring. Dessutom måste de laster som packningsmaskinen ger upphov till medräknas. Vidare måste man ta hänsyn till den hydrostatiska lasten från pressvattnet. Storleken på denna senare last är helt beroende av till vilken nivå pressvatten kommer att uppstå. Detta tryck mot siloväggen blir det samma som det vattentryck man skulle få om motsvarande vattenmängd fanns i silon.

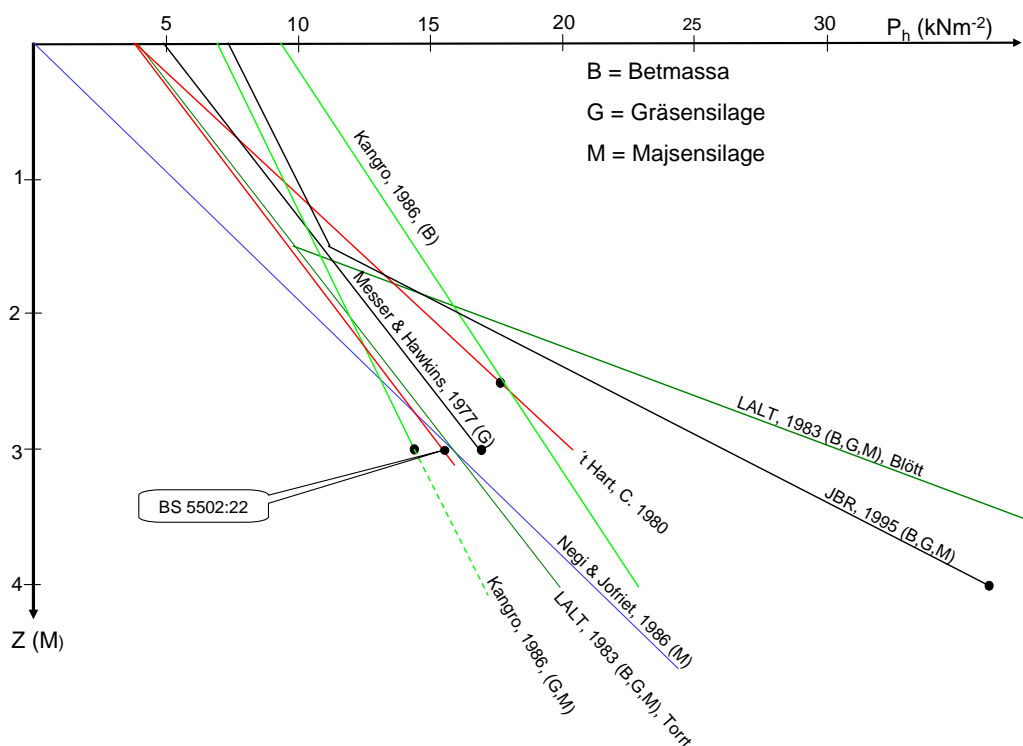
I samband med dimensioneringen av siloväggen och dess infästning i plattan kommer den uppskattade nivån på pressvattnet därför att få avgörande betydelse för utformning och materialmängder. Tidigare har i Sverige rekommendationer och anvisningar från Lantbruksstyrelsen och Jordbruksverket (LALT, 1983; JBR, 1995) tillämpats vid hållfasthetsdimensioneringen. Dessa gäller inte längre. De var dessutom framtagna att gälla för silor med väggar upp till ca 3 meter. Emellertid kommer de fortfarande, i brist på andra relevanta anvisningar, till användning.

I dessa anvisningar anges att man, förutom lasten från själva ensilaget, skall räkna med ett tryck från pressvatten motsvarande det från vatten som har sin överyta 1,5 meter under maximal fyllningshöjd. Kravet på att man skall förutsätta denna höga pressvattennivå i samband med dimensioneringen baseras på mätningar gjorda i samband med inläggning i en silo med vägghöjden 2 meter (Kangro, 1986).

Det kan emellertid ifrågasättas hur generellt giltiga dessa mätvärden är. Effekten av denna tillskottslast har mindre betydelse vid lägre vägghöjd. Emellertid blir lasttillskottet avsevärt då vägghöjden blir uppåt 4 meter eller mer. Erfarenheterna från praktiken pekar dock på att trycktillskottet av pressvatten verkar vara överskattat. Avrinningen av pressvatten förefaller inte vara av denna storleksordning.

En jämförelse med utländska anvisningar och forskningsresultat (bl.a. Gruyaert et al., 2007; JBR, 1995; Kangro, 1986; LALT, 1983; Martens, 1993; Negi & Jofriet, 1986; Nilsson, 1982; Van Nuffel et al., 2008) visar också att de svenska dimensioneringsanvisningarna som tillämpas anger att man skall räkna med extremt höga laster. Vidare kan man anta att det idag inte är samma storlek på de dimensionerande lasterna, eftersom vi har andra typer av ensilage och större packningsmaskiner.

Resultatet av den orienterande studien sammanfattas i figur 1, där några tillämpade anvisningar och rekommendationer sammanställts. Av figuren framgår att de svenska anvisningarna (JBR, 1995) föreskriver att man skall ta hänsyn till större laster än i utländska rekommendationer då siloväggen är mer än ca 2 meter hög. För en 4 meter hög silovägg skall man dimensionera för en last som i stort sett är dubbelt så stor som anges i andra källor.



Figur 1. Sammanställning av resultat från den inledande studien där olika anvisningar och rekommendationer för silovägtryck sammanställs. Vertikala axeln (z) anger avstånd (meter) under ensilagetets överyta; horisontella axeln (P_h) anger horisontaltryck (kN/m^2) mot siloväggen som uppmätts eller anges i olika anvisningar.

För närvarande pågår inom ramen för SIS (Standardiseringskommissionen i Sverige) ett arbete med att revidera standarden för plansilor och att ta fram en handbok, i vilken dimensioneringsanvisningar för plansilorna avses att tas in. För detta arbete krävs bättre underlag för dimensioneringsanvisningarna.

Sammantaget tyder mycket på att de svenska dimensioneringsförutsättningarna är felaktiga. Lasten från pressvatten torde vara avsevärt lägre. Mera exakta och tillförlitliga värden måste fastslås genom mätningar i praktiken.

1.3 Syfte och motivering

Projektets syfte var att ta fram exaktare underlag för dimensionering av plansilor, så att lantbrukarna får en produkt för säker lagring till ekonomiskt rimligt pris

Målet var att bestämma maximalt förekommande pressvattennivå i ett antal plansilor för att avgöra vilka pressvattennivåer som är realistiska att ta hänsyn till vid dimensionering av vägg och bottenplatta.

Hypotesen var att nuvarande dimensioneringsanvisningar överskattar de belastningar som uppstår från ensilage och pressvatten.

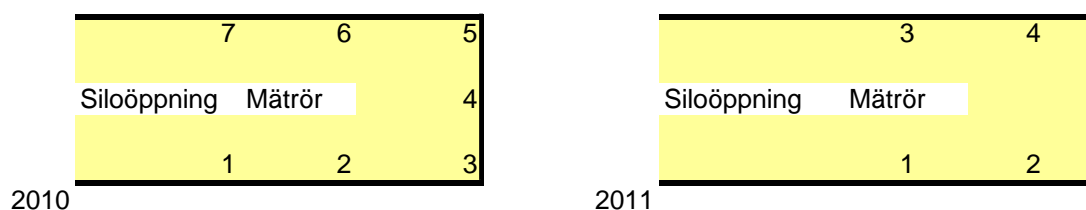
2 Material och metoder

2.1 Försöksuppställning

Pressvattenmätningar i plansilor genomfördes som fältmätningar på gårdar i Halland, Västergötland, Skåne och på Öland. Mätningarna utfördes under 1:a till 4:e skörd av ensilage på gårdarna där flertalet silor innehöll gräs- och någon majsensilage. Olika klimatförutsättningar täcktes in genom en geografiska spridningen av försöksgårdarna.

Strax innan skörd placerades 6-7 slitsade stålrör ($\text{Ø} = \frac{3}{4}$ ”; slitsvidd ca 1,1 mm) ut längs silofackens väggar. Under en 14-dagars period registrerades pressvattennivån i silon varje dag under första veckan samt varannan dag den andra veckan. Mätningen genomfördes med hjälp av tumstock där bottendelen på röret fungerade som referenspunkt för vätskenivån.

Huvudsakligen siloväggar med 3 eller 4 m höjd ingick i försöket, men någon silovägg var endast 2,20 m hög. Längden på silofack samt silobredd varierade mycket. Bland 3 m silorna fanns bredder på 4-10 m, och silolängder på 30-42 m. Av pressvattenrören placerades ett i varje hörn i silons kortända och i de fall silonbredden översteg 6 m och bredden inte var lägre än sidoväggarna, placerades även ett rör mitt på kortändan. Det första pressvattenröret i silons längdriktning placerades där ensilagenivån började luta nedåt mot öppningen. På halva avståndet mellan hörnröret och det främre röret i silons längdriktning placerades ytterligare ett rör, resulterande i sju pressvattenrör längs silons tre väggar, se figur 2 och 3.



Figur 2. Placering av mätrör i plansilo vid 2010 respektive 2011 års mätningar.



Figur 3. Placering av pressvattenrör längs silovägg, detalj av rörhållare och rörpropp samt rörslitsar 0,26 m och 0,46 m från silobotten (slitsvidd ca 1,1 mm).

Samtliga försöksvärdar registrerade vattenhalten vid respektive ensilageskörd. Två grupper av silostorlekar var representerade, de mindre (silohöjd 3 m) med inläggningsmängd av ensilage på 5-25 m³ i varje lager och packning av traktor/lastmaskin om 4-7 ton, och de

större (silohöjd 3 eller 4 m) med inläggningsmängd av ensilage på 40-50 m³ i varje lager och packning av traktor/lastmaskin om 12-13 ton.

Uppgifter om ensileringsrutiner, hackselä längd hos skörde gods, packningsmaskinernas storlek, antal överfarer per packningsomgång och skiktjocklek av skörde gods per packningsomgång samlades in från de deltagande lantbruksföretagen. Under 2011 utfördes ytterligare pressvattenmätningar i silor med gräs- och majsensilage i Västergötland, Öland och Skåne. Mätperiodens längd var då 1-5 månader och omfattade 1:a – 4:e skörd. Antalet mättror reducerades till 4 st, se figur 2. Vid samtliga pressvattennivåmätningar var den slutliga ensilagehöjden lika med silohöjden.

3 Resultat

3.1 Skördeförhållanden under mätperioden

Mycket olika förutsättningar rådde under skördeperioden 2010. Våren var kall vilket försenade gräskörden och medförde sämre förtorkning av ensilaget innan inläggning vilket i sin tur resulterade i låga ts-halter i allmänhet hos första skörden, tabell 1. Andra skörden inträffade under torrare väderlek, vilket påverkade skördevolymen. Tredje skörden in på hösten hade varierande förutsättningar. Majsskörd inträffade i början av oktober på två gårdar, också den med varierande ts-halt. Mätningar utfördes i 14 silor.

Tabell 1. Ts-halt och hackselä längd hos gräsensilage och majs vid ensilering 2010

Parameter	Svalöv	Skurup	Önne stad	Borås	Falköping	Öland	Varberg
% ts, 1:a skörd	28	27-30 ¹	28-35	42,2	30,5-32 ²	26	
% ts, 2:a skörd	21			34,7	32-41	44	
% ts, 3:e skörd					24	59	
% ts, majsskörd					22-23		31-32
Hacklängd, mm	50	50-70	50	50	50	50	50

¹) ts om 27 % i 2/3 av grönmassan, resterande hade 30 % ts.

²) torrare i de första lagren, blötare upptill/framåt i silo.

Också 2011 var ett besvärligt år för 2:a skörd i Skåne, för 1:a, 2:a och 4:e skörd i Falköping. Tredje skörden inträffade 1 månad senare än normalt. Mätningar utfördes i 10 silor.

Tabell 2. Ts-halt och hackselä längd hos gräsensilage och majs vid ensilering 2011

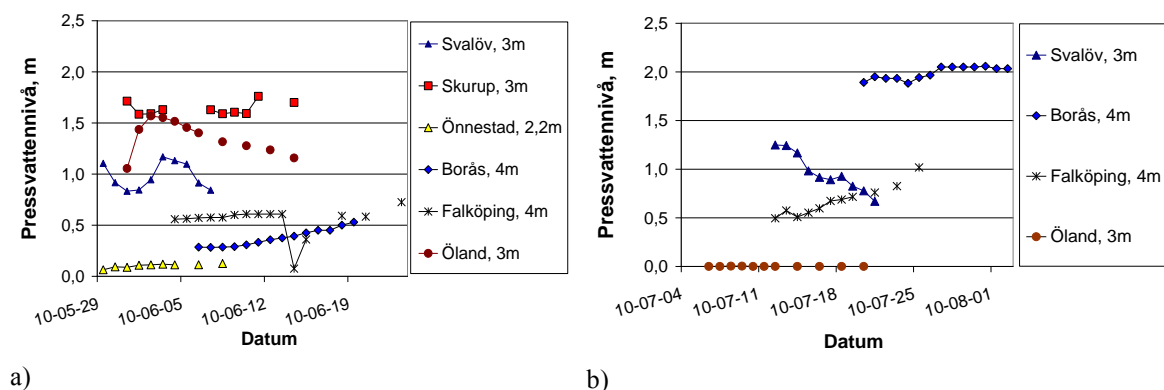
Parameter	Klippan	Falköping	Öland
% ts, 1:a skörd	27	29	42
% ts, 2:a skörd	27	24	-
% ts, 3:e skörd	29	29	27
% ts, majsskörd	39	30	-
Hacklängd, mm	50	50	50

3.2 Pressvätskenivå i plansilo

Med olika skördeförutsättningar under 2010 kom pressvattennivåerna att variera kraftigt mellan skördarna, se figur 4. Medelvärde och standardavvikelse (SD) beräknades på mätvärdena från pressvattennivåmätningarna under mätperioden, dels för att åskådliggöra variationen dels för få ett mått på mätnoggrannheten. För 3 och 4 meters silorna, sammanlagt

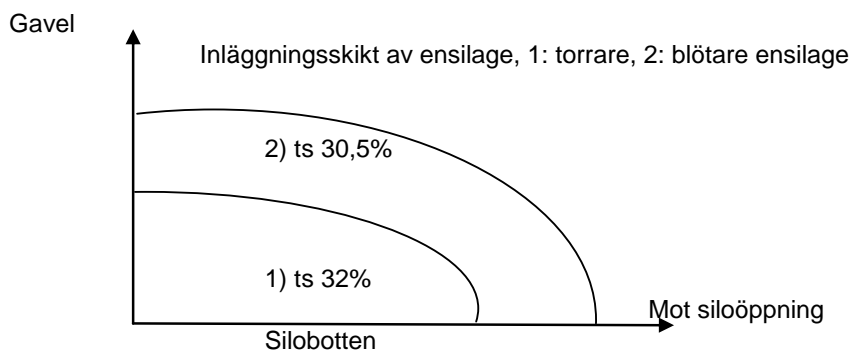
72 respektive 60 rör, blev det totala medelvärdet och (SD) för pressvattennivån 0.71 m (0.64) respektive 1.48 m (1.19). Mätvärdesvariationen var stor, vilket också speglar skördeförhållandena på våren och under hösten.

Mätnoggrannheten vid pressvattennivåmätningarna kan illustreras av mätvärdesvariationen i de enskilda rören. Variationen är här uttryckt som medelvärde av standardavvikelse för mätvärdena i 3 respektive 4 m silorna. Denna variation blev 0.24 för silor med 3 m vägghöjd respektive 0.13 för silor med 4 m vägghöjd under mätperioden 2010. Den mest sannolika förklaringen till lägre variation hos 4 m silorna torde vara att mätningarna i dessa utfördes med mätsticka i stället för tumstock.



Figur 4. a) Pressvattennivå vid 1:a skörd; medelvärden av 4 -7 mätrör i respektive silo och ca 10 registreringar per mätrör. b) Pressvattennivå vid 2:a skörd; medelvärden av 4-7 mätrör i respektive silo ca 10 registreringar per mätrör.

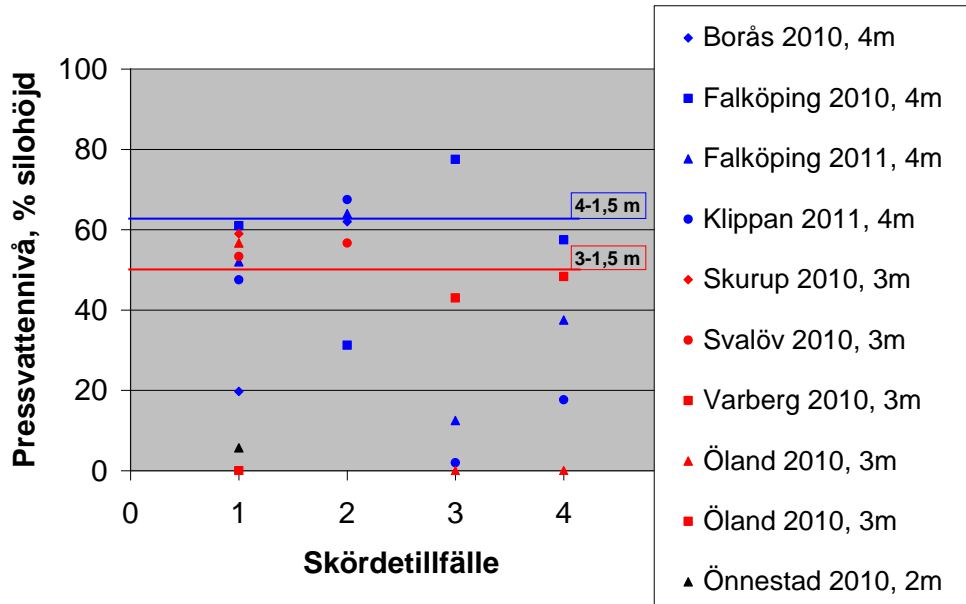
För att utröna om 14 dagars mätperiod var tillräcklig samt om pressvatten stod kvar i silorna därefter, utfördes ytterligare mätningar i silor med låg ts-halt vid de tidigare mätningarna. Resultaten från 3 silor, var att två silor (3 resp 4 m) hade 76-89% av pressvattennivån kvarstående 4 - 5 månader efter inläggningsdatum. I en andra 4 m silo hade pressvattennivån ändrats från ett medelv på 0.6 m (SD = 0.79) till 1.9 m (SD = 0.58). En stor omfördelning av pressvattennivån hade inträffat inom silon, vilket illustreras i figur 5.



Figur 5. Sektion i silons längdriktning. Pressvattennivåns förändring utifrån olika ts-halt vid inläggning. Det torrare skiktet 1 blev med tiden det blötaste med högst pressvattennivå.

År 2011 utfördes mätningar i ytterligare 10 silor. Hos 5 av dessa silor ökade och omfördelades pressvattennivån under de första 1-3 månaderna efter inläggning och i samtliga kvarstod i medeltal 90 % av pressvattennivån i oöppnade silor. I de 24 studerade silorna

2010/11 inställde sig maximala pressvattennivån i medeltal på 39 % av silohöjden. En högsta pressvattennivå om 78 % av silohöjden inträffade i ett fall av 24. Den högsta pressvattengränsen i plansilor, 1,5 m under ensilageytan enligt Kangro (1986), överskreds vid 4 respektive 3 tillfällen i 3 respektive 4 meters silor.

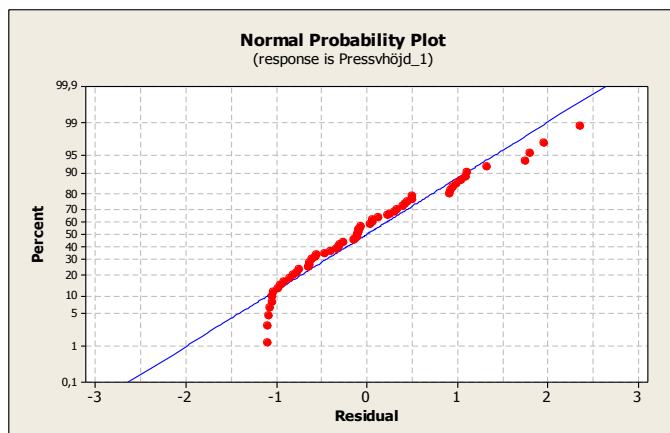


Figur 6. Sammanställning av maximal pressvattennivån i 24 silor under 2010/11. Varje punkt är medelvärdet av 6-10 mätningar i respektive silo. Röd respektive blå linje markerar maximal pressvattennivå för 3 respektive 4 m silor enligt Kangro (1986).

3.3 Samband ts-halt och pressvättskenivå i plansilo

Flera faktorer påverkar ensilagedensiteten: ts-halten, fibermaterial, hacksel längd och packningstyngd från fordon (Schemel et al., 2010). De studerade gårdarna hade samma hacksel längd och fibermaterial vilket skördades vid samma biologiska utvecklingsstadium.

Packmaskinens tyngd samt inläggningsmängder och fördelning av inlagt gods per packnings-omgång har varierat förutom ts-halten. Ts-halten vid inläggning är dock beroende av lokala väderförhållanden och beslut om skördetidpunkt tas utifrån förväntat väder vägt mot ensilagens aktuella utvecklingsstadium.



Figur 7. Visar normalfördelning av pressvattennivåer från 10 silomätningar med medelvärden från 4-7 mättror per silo.

Uppgifter om ts-halter hos skördegodset erhållna vid inläggningstillfället jämfördes med uppmätta pressvattennivåer från 10 silomätningar genom regressionsanalys i Minitab. Figur 7 visar hur mätdata från de 10 silomätningar av pressvatten fördelade sig. Regressionsanalysen visade signifikant samband mellan ts-halt vid ensilageinläggning och uppmätt pressvattennivå i plansilo efter inläggning, $p = 0,012$.

4 Diskussion och slutsatser

4.1 Pressvätskenivå i plansilo

Pressvattennivån i silor kan variera kraftigt mellan skördar inom samma gård och på grund av geografiska ort. Om variationer i ts-halt vid skörd är större i Skandinavien jämfört med övriga Europa vet vi inte men det är troligt att vi periodvis har större nederbörd och perioder med temperaturnivåer där det tar längre tid att öka ts-halt vid skörd, dvs upptorkning efter regn, speciellt fram på hösten.

Pressvattenmängden i en silo beror på ensilagens ts-halt, tryck och packning i silon, fibermaterial, hackelselängd och förtorkning av grödan. Ts-halten i sin tur påverkas av sortval, mognadstadium, gödsling, dagg och nederbörd (Stewart & McCullough, 1974). O'Donnell (1993) anger att vätskemängd och dess flöde är helt beroende av silokonstruktionen och dess dräneringssystem. Faktorer som bestämmer dräneringsflödet från silon är trycket inom silon, materialets genomsläpplighet och om det finns dräneringskanaler eller inte. Typiska mängder pressvatten från gräsensilage vid 18 % ts är 150 l/ton (Stewart & McCullough, 1974). Gräsensilage ensilerat i plansilo med en ts-halt över 30 % producerar inget eller mycket lite pressvatten (Bastiman, 1976).

Ett nära samband mellan pressvattenmängder och ts-halt har konstaterats i tidigare undersökningar (Bastiman, 1976; Sutter, 1955), vilket också framkom i denna studie. Att pressvattennivån till stora delar verkar stå kvar i silon under lagringstiden, dvs att en mindre mängd läcker ur silofacket på framsidan av silon, verkar helt följdriktigt enligt O'Donnell (1993) då ingen dränering fanns i de silor som ingått i studien.

Mätningar med mätsticka resulterade i lägre mätvärdesvariation och var en tillförlitlig metod. Uppmätt ts-halt vid inläggning kunde inte alltid kopplas till pressvattennivån i silon. Hur urvalet av grönmassa görs vid provtagning är mycket viktigt för att få fram ett representativt prov. För Borås 1:a skörd och Ölands 2:a skörd var ts-halten ungefär lika, men pressvattennivån skiljer sig som mest 0,5 m. Även vid Borås 2:a skörd, med 34,7 % ts-halt, är pressvattennivån på ca 2 m förvånansvärt hög.

Förekommer olika ts-halter skiktvis vid inläggningen, kan pressvattenmängden omfördelas radikalt mellan olika skikt i silon, dvs uppiifrån och ner. Vid majsskörd i Falköping 2010 ökade pressvattennivån i medeltal 11 % en månad efter skörd p.g.a. omfördelning i silon. Under 2011 ökade och omfördelades pressvattennivån under de första månaderna efter inläggning i 55 % av mätningarna, vilket visade att en mätperiod om 14 dagar är för kort. Giltigheten av de pressvattennivåer som anges av Kangro (1986) kan vara tveksamma vid jämförelse med ovanstående resultat, då Kangros mätningar endast utfördes under inläggningen av ensilage i silo och inte omfattar efterföljande lagringsperiod.

Att uttrycka maximal pressvattennivån i % av silohöjden förefaller mer adekvat än att ange den som ett bestämt avstånd från siloytan enligt ovanstående resultat i figur 6. Det kan

vara rimligt att räkna med en pressvattennivå på förslagsvis 60 % av silohöjden. Vid jämförelse mellan detta föreslag och nivån 1,5 m under siloytan (Kangro, 1986) kan man konstatera att maximala pressvattennivån för 3-4 m silor inte skiljer i nämvärd utsträckning. Däremot blir den maximala pressvattennivån enligt förslaget lägre vid större silohöjder.

För att försäkra sig om att pressvattennivån inte stiger högre, och därmed orsakar motsvarande högre last mot siloväggarna, kan man använda dräneringssystem (med vattenlås) i silokonstruktionen.

Definitivt svar på hur pressvattennivån påverkar tryckbelastningen mot siloväggen kan endast erhållas med tryckmätningar vid inläggning i silor och mätningar under en tidsperiod efter att ensilagemassan har satt sig.

4.2 Slutsatser

- Metodiken att mäta pressvattennivån i plansilor fungerade med 2-3 månaders mätperiod.
- Pressvattennivån i silor kan variera kraftigt mellan skördar på samma gård beroende på väderlek och geografiska ort.
- Medelvärdet av maximalt registrerad pressvattennivå uppgick till 39 % av silohöjden
- Ett direkt samband fanns mellan ts-halt i ensilage och pressvattennivån i silor. Däremot är det svårt att ange förväntad pressvattennivå utifrån ts-halt bestämd i fält
- Pressvatten tycks till stora delar stå kvar i silon under lagringstiden men kan omfördelas radikalt mellan olika skikt i silon
- Förslagsvis borde man, som riktlinje vid dimensionering, kunna utgå från att pressvattennivån ligger på 60 % av silohöjden
- Fler mätningar behövs för att verifiera ovanstående resultat.

5 Resultatförmedling

- Poster på Borgeby Fältdagar, 2011
- Poster på ELMIA Djur & Inomgård, 2011
- Beskrivning av projektet på institutionens hemsida:

<http://www.slu.se/sv/fakulteter/ltj/om-fakulteten/institutioner-/lbt/forskning/hallfasthetsdimensionering-av-vaggar-till-plansilor/>

- Resultaten kommer att inarbetas i kommande, reviderad svensk standard (SIS) för plansilor. Detta arbete pågår i en särskild arbetsgrupp inom ramen för TK 520.

6 Litteratur

Bastiman, B. 1976. Factors affecting silage effluent production. *Experimental Husbandry*, 31, 40-46.

Gruyaert, E., De Belie, N., Matthys, S., Van Nuffel, A. & Sonck, B. 2007. Pressures and deformations of bunker silo walls. *Biosystems Engineering* 97 (2007) 61-74.

- JBR. 1995. Jordbruksverkets Bygg Råd. Handbok Ekonomibyggnader. Jordbruksverket. Jönköping.
- Kangro, A. 1986. Lastmätningar i plansilo för ensilage. Sveriges lantbruksuniversitet, Inst. för lantbrukets byggnadsteknik. Rapport 48. Lund.
- LALT. 1983. LALT-publikation 2 – Byggnadskonstruktioner. Lantbruksstyrelsens anvisningar för produktionsbyggnader inom lantbruks- och trädgårdsnäringen. Jönköping.
- Martens, P. 1993. Die Neufassung der DIN 11622 – Gärffuttersilos und Gütterbehälter. Proceedings of the Symposium Concrete for a Sustainable Agriculture. BIBM, Cembureau, ERMCO, CIGR. Bologna, Italy 21-23 April 1993.
- Messer, H. J. M. & Hawkins, J.C. 1977. The loads exerted by grass silage on bunker silo walls. *J. agric. Engng Res.* (1977) 22, 327-339.
- Negi, S. C. & Jofriet, J. C. 1986. Computer-aided prediction of silo-wall pressures. *ASAE Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 2(2) November 1986. St. Joseph, Michigan.
- Nilsson, L. 1982. Laster i ensilagesilor – Genomgång av litteratur och normer. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik. Rapport 23. Lund.
- O'Donnell, C. 1993. A study of the effects of silage effluent on concrete. MEngSc thesis, National University of Ireland.
- Schemel, H., Füll, C., & Hoffmann T. 2010. Compression of chopped grass maize and grass in a bunker silo with vibrating rollers. *Ag Eng Clermont-Ferrand*, Sept. 6-8, 2010. ref 015.
- Stewart, T.A. & McCullough, I.I. 1974. Silage effluent, quantities produced composition and disposal. *Agriculture in N. Ireland*, 48, 368-374.
- Sutter, A. 1955. Problems of waste effluent from silage. Project 307, OEEC, 74-82.
- Van Nuffel, A., Vangeyte, J., Baert, J., Maertens, W. & Sonck, B. 2008. Is literature on the pressure on farm trench silos walls still accurate? Paper P-105 presented at AgEng2008 International Conference on Agricultural Engineering, 23-25 June 2008, Hersonissos, Crete, Greece.
- † Hart, C. 1980. Constructieve richtlijnen voor sleufsilos voor de opslag van kuilvoer. (Constructive guidelines for horizontal silos for the storage of silage). *PT Bouwkunde, Wegen- en Waterbouw*, 35(10), 584-587.